



Universiteit
Leiden

The Netherlands

Paul Ehrenfest : worstelingen met de moderne wetenschap, 1912-1933

Hollestelle, M.J.

Citation

Hollestelle, M. J. (2011, February 17). *Paul Ehrenfest : worstelingen met de moderne wetenschap, 1912-1933*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/16499>

Version: Not Applicable (or Unknown)

License: [Leiden University Non-exclusive license](#)

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/16499>

Note: To cite this publication please use the final published version (if applicable).

Paul Ehrenfest. Worstelingen met de moderne wetenschap, 1912-1933



Leiden University Press

Ontwerp omslag: Maedium, Utrecht
Omslagafbeelding: *Portret van Prof. dr. Paulus Ehrenfest*, schilderij
door Harm Kamerlingh Onnes, 1920 (Foto: Stedelijk Museum
Amsterdam)
Ontwerp binnenwerk: M.J. Hollestelle

ISBN 978 90 8728 122 9
NUR 685

© M. Hollestelle / Leiden University Press, 2011

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden
verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of
openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch,
mechanisch, door fotokopieën, opnamen of enige andere manier, zonder
voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

Voorzover het maken van kopieën uit deze uitgave is toegestaan op
grond van artikel 16B Auteurswet 1912 j° het Besluit van 20 juni 1974,
Stb. 351, zoals gewijzigd bij het Besluit van 23 augustus 1985, Stb. 471
en artikel 17 Auteurswet 1912, dient men de daarvoor wettelijk
verschuldigde vergoedingen te voldoen aan de Stichting Reprorecht
(Postbus 3051, 2130 KB Hoofddorp). Voor het overnemen van gedeelte(n)
uit deze uitgave in bloemlezingen, readers en andere compilatiewerken
(artikel 16 Auteurswet 1912) dient men zich tot de uitgever te wenden.

Paul Ehrenfest.
Worstelingen met de moderne wetenschap, 1912-1933

PROEFSCHRIFT

ter verkrijging van
de graad van Doctor aan de Universiteit Leiden,
op gezag van Rector Magnificus prof. mr. P.F. van der Heijden,
volgens besluit van het College voor Promoties
te verdedigen op donderdag 17 februari 2011
klokke 13:45 uur

door

Marijn Johannes Hollestelle

geboren te Nieuwegein
in 1977

Promotiecommissie:

Promotores:

Prof. dr. F.H. van Lunteren (Universiteit Leiden, VU)
Prof. dr. R.P.W. Visser (Universiteit Leiden)

Overige leden:

Prof. dr. S.M. Verduyn Lunel (Universiteit Leiden)
Prof. dr. C.W.J. Beenakker (Universiteit Leiden)
Prof. dr. D. van Delft (Universiteit Leiden)
Prof. dr. D.G.B.J. Dieks (Universiteit Utrecht)
Prof. dr. A.J. Kox (Universiteit van Amsterdam)
Prof. dr. W. Otterspeer (Universiteit Leiden)
Prof. dr. B. Theunissen (Universiteit Utrecht)

Inhoud

Voorwoord

Inleiding	1
Bronnen	4
Inhoud	7

Hoofdstuk 1: Biografische schets	9
Jeugd	9
Studie	10
Verhuizing naar Rusland	13
De zoektocht naar werk	15
De keuze voor Ehrenfest	23
Ehrenfest in Leiden	26
Opstapelende problemen	32

Hoofdstuk 2: Onderwijs

Deel 1: Ehrenfests vernieuwende onderwijs	36
Pedagogiek en onderzoeksstijl	38
Leeskamer Bosscha	42
De studie	44
Colleges	49
Het colloquium	58
Ehrenfest de pedagoog	62

Deel 2: Leerlingen	71
Leerlingen	71
Bemiddeling voor studenten	86
Invloed op de Nederlandse natuurkunde	92

Hoofdstuk 3: Veranderende fysica	97
Natuurkunde rond 1900	98
Relativiteitstheorie	102
Quantumtheorie	104
Nogmaals de relativiteitstheorie	108

Dimensionaliteit	113
Ontstaan van de oude quantumtheorie	118
De adiabatische hypothese	120
Quantumstatistiek	130
Andere quantumproblemen	137
Slot	151
Hoofdstuk 4: Quantumtheorie en moderniteit	153
Inleiding	153
Ontstaan van de theoretische fysica	156
Specialisatie en fragmentatie	159
Wiskundigen uit Göttingen	160
Mathematisering	163
Snelheid	166
Verlies aan aanschouwelijkheid en samenhang	169
Vorming van fysici	172
Tot slot; de gevolgen	174
Hoofdstuk 5: Zuivere wetenschap en praktisch nut	180
Inleiding	180
Zuivere wetenschap?	181
NatLab colloquia	185
Een reis naar de VS	190
Toegepaste fysica aan de universiteit	193
Veranderingen binnen de universiteiten	199
Hoofdstuk 6: Theoretische fysica in tijden van depressie	204
Inleiding	204
Ehrenfests economische belangstelling	207
Ehrenfests plan: Een fysisch-economische opleiding	210
Economie aan hogeschool en universiteit (1)	217
De opleiding van Ehrenfest en Tinbergen	220
Economie op hogeschool en universiteit (2)	224
Economie en planidee	226
Technocratie	229
Hoofdstuk 7: Internationale contacten	235
Inleiding: internationalisering van de Nederlandse fysica	235
De Eerste Wereldoorlog en de internationale fysica	240

Rusland	246
Amerika	260
Joodse vluchtelingen in 1933	266
Conclusie	281
Hoofdstuk 8: Bloei en verval van de Leidse theoretische fysica	284
Bloei van het Theoretisch Fysisch Instituut	285
Internationalisering van de theoretische fysica	287
Leerlingen als exportproduct	292
Bezoeken	298
Conclusie	308
Conclusie	311
Tolk van zijn tijd	312
Ehrenfest als wegwijzer	315
Summary	320
Literatuurlijst	331
Curriculum Vitae	360

Voorwoord

Dit proefschrift was niet geschreven zonder het enthousiasme van Frans Saris, de voormalige decaan van de Leidse faculteit Wiskunde en Natuurwetenschappen. Zijn steun maakte het voor mij mogelijk om dit proefschrift te schrijven en daarvoor ben ik hem zeer dankbaar. Na mijn aanstelling in januari 2006 werd Rob Visser mijn promotor. Nadat Rob met emeritaat was gegaan nam Frans van Lunteren grotendeels het stokje over. Met dankbaarheid denk ik terug aan hun nuttige commentaar en advies.

Vele anderen hebben mij op enigerlei wijze geholpen bij het schrijven van dit proefschrift. Graag neem ik hier de gelegenheid hen te bedanken. Allereerst alle bibliotheekmedewerkers van de UB Utrecht, in het bijzonder Nieneke Elsenaar. I also thank Lauren Brown, curator of the Archives and Manuscripts Department of the University of Maryland, USA. Verder dank ik Godelieve Bolten, Martje Kruk, Jerry Westerweel, Jan Jüngen, Ben van Gansewinkel, Kees Boersma, Johan Lugtenburg en Ard van Sighem.

Alle medewerkers van het IGG dank ik voor hun gastvrijheid, interesse en de vele dingen die ik van hen heb geleerd. Ik dank Paul Koopman, Jantine Beuvers en Anne-Hilde van Baal van het Huizinga Instituut voor de hoeveelheid energie die zij steken in 'hun' promovendi.

Tallose mensen hebben in verschillende stadia van dit proefschrift één, meerdere, of zelfs alle hoofdstukken gelezen en becommentarieerd. Ik dank ten zeerste David Baneke, Daan Wegener, Geert Somsen, Bert Theunissen, Dirk van Delft en Marga en Ineke Froom.

In het bijzonder dank ik Ineke en Christiaan voor hun grenzeloze liefde, geduld en begrip. Christiaan dank ik bovendien voor zijn humor, en zijn nooit wijkende vrolijkheid, waarmee ik, de verstrooide papa, thuis altijd weer uit mijn hoofd werd geschud.

Inleiding

Paul Ehrenfest als tolk van dezen tijd

Philip Kohnstamm

Op 23 februari 1912 vond een bijzondere ontmoeting plaats op het station van Praag. Paul Ehrenfest, een gerenommeerde doch werkloze Oostenrijkse fysicus, stapte op het drukke perron uit een zojuist aangekomen trein. Na enig zoeken ontwaarde hij Einstein in de menigte. En waarschijnlijk stoorde Ehrenfest zich als principiële geheelonthouder onmiddellijk aan Einsteins sigaar. Maar kort daarna was Ehrenfest dit bezwaar geheel vergeten. Want al hadden ze elkaar nog nooit eerder ontmoet, vrijwel vanaf het eerste moment dat ze met elkaar spraken vormde zich een warme band tussen de twee. Ze vulden de dagen van Ehrenfests bezoek met gezamenlijk musiceren, lange wandelingen en even zo lange gesprekken en geanimeerde discussies over de brandende kwesties in de natuurkunde. Einstein vond in Ehrenfest een waardige sparringpartner voor zijn ideeën. Hij zou over hun ontmoeting schrijven: ‘Nach wenigen Stunden waren wir wirkliche Freunde – Menschen, die durch ihr Streben und Sehnen wie für einander geschaffen waren.’¹ De vriendschap bleef de rest van Ehrenfests leven zeer hecht. Ze hadden dan ook veel met elkaar gemeen: ze waren even oud, beiden Joods, deelden een sterke liefde voor muziek, hadden een kosmopolitische blik op de wereld, een scherp gevoel voor recht en onrecht, bezaten beiden een haardos die bij vlagen oncontroleerbaar leek, en waren beiden bezeten door de theoretische natuurkunde.

Einstein is nog steeds wereldberoemd, terwijl Ehrenfest, althans voor het grote publiek, de duisternis van de vergetelheid is binnengegleden. De oorzaak van dit verschil? Einstein heeft een aantal baanbrekende natuurkundige theorieën en inzichten ontwikkeld, Ehrenfest niet. Natuurlijk is Ehrenfest niet helemaal vergeten, zeker niet onder fysici, maar het is tekenend dat juist het boek dat de lezer nu in handen heeft pas tot stand is gekomen nadat bij het doorbladeren van één van de boeken uit de bibliotheek van *Ehrenfest* een handgeschreven artikel van *Einstein* tevoorschijn kwam. Waarom dan toch een boek over

¹ Einstein, ‘Nachruf Paul Ehrenfest’ (1934) 94–95.

Ehrenfest? Simpelweg omdat er zoveel meer over deze markante en complexe fysicus te vertellen is. En omdat zijn invloed op de fysica groot is geweest – zij het dat die invloed zich deed gelden op een aantal heel andere domeinen dan die van de grote ontdekkingen. En niet in de laatste plaats omdat Ehrenfest zich in zijn correspondentie een spiegel van zijn tijd toonde.

Paul Ehrenfest was van oorsprong een Oostenrijkse fysicus. In 1912 werd hij hoogleraar theoretische fysica te Leiden; hij bleef dit tot aan zijn dood in 1933. Dit boek gaat over Ehrenfests Leidse periode. In Leiden kreeg Ehrenfest voor het eerst een vaste aanstelling, en dus ook de kans zijn eigen ideeën betreffende onderzoek en onderwijs door te voeren. En dat heeft Leiden geweten.

Niet dat Leiden tot dan niets voorstelde; de Leidse fysica was in Nederland de onbetwiste koploper en wereldwijd toonaangevend. De experimentele fysica werd er vertegenwoordigd door Kamerlingh Onnes. Onnes bouwde vanaf 1882 een cryogeen laboratorium op dat zijn weerga niet kende. In 1908 maakte hij als eerste helium vloeibaar, en hij ontdekte in 1911 de supergeleiding. In 1913 kreeg hij de Nobelprijs voor de resultaten van zijn cryogeen onderzoek. De Leidse theoretische fysica had haar eigen coryfee, de wereldberoemde Hendrik Antoon Lorentz. Lorentz had al in 1902 de Nobelprijs gewonnen vanwege de verklaring die zijn elektronentheorie wist te geven voor het Zeeman-effect. De experimentele en de theoretische fysica waren in Leiden zeer succesvol.

In Onnes' lab vond *Big Science* plaats; met een grote hoeveelheid apparatuur, onderhouden door een klein legertje technici, werd getracht tot steeds lagere temperaturen te komen. Het laboratorium stond in contact met buitenlandse geleerden, had een eigen instrumentmakersschool, een groot budget, en bleef in omvang toenemen. Dat stond in schril contrast met de groep theoretische fysica, die twee kamertjes in het Natuurkundig Laboratorium had betrokken, die door Lorentz en zijn assistent werden gedeeld. Veel ondersteunend personeel was er niet nodig en als instrumentarium was gewoonlijk de combinatie van potlood en papier voldoende. Lorentz werkte in bijna volledige isolatie, maar zijn faam was er niet minder om. Toch ontbrak het aan iets binnen de theoretische fysica, maar nog niemand had daar het etiket 'onderzoeksschool' of 'internationalisering' op geplakt.

Na Ehrenfests komst groeide Leiden uit tot een internationaal centrum waar de allernieuwste ontwikkelingen in de theoretische fysica

werden bediscussieerd, met Ehrenfest als charismatisch middelpunt. Samen met het internationaal georiënteerde experimentele laboratorium van Kamerlingh Onnes, en diens opvolgers De Haas en Keesom, werd Leiden zo een snelkookpan voor de internationale wetenschap.² Ehrenfest leidde een aantal zeer verdienstelijke onderzoekers op, die bijna allemaal hoogleraar werden. Hij zorgde anders dan zijn voorganger Lorentz voor de ontwikkeling van een eigen onderzoeksschool.

Met het verschijnen van de door Martin Klein geschreven biografie *Paul Ehrenfest, Volume 1: The making of a theoretical physicist* kreeg een groter publiek voor het eerst een blik in het leven van Ehrenfest tot rond 1920.³ Helaas is het voorgenomen tweede deel nooit verschenen.⁴ Er bestaat dus nog steeds een substantieel hiaat. Ik pak de draad al op in 1912, het jaar van Ehrenfests benoeming in Leiden. Heel nadrukkelijk kijk ik naar de Leidse periode van Ehrenfest.

Niet alleen Ehrenfests wetenschappelijke publicaties verdienen aandacht, hij heeft zeker belangwekkend werk verricht, maar nog belangrijker was zijn rol in een groot internationaal wetenschappelijk netwerk. Hij stond met zeer veel collega's in persoonlijk contact en speelde een belangrijke rol in het bekritisieren en bediscussiëren van het werk van anderen. Zijn inzet daarvoor, gecombineerd met zijn geestigheid en zijn helderheidsdrang, maakte hem een katalysator voor de internationale wetenschap. Hij spande zich in om wetenschappers tot samenwerken te brengen en bemiddelde veelvuldig bij de carrières van jonge fysici. Wanneer we naar Ehrenfest kijken, dan is het onmogelijk om de wetenschap van de persoon te scheiden; deze zijn innig verweven. Juist Ehrenfests zeer grote persoonlijke betrokkenheid en inzet bij het onderzoek en onderwijs stonden aan de basis van het Leidse internationale succes.

Daarnaast is Ehrenfest om andere redenen interessant. Ik wil Ehrenfest als voorbeeld gebruiken om te laten zien hoe wetenschappers omgingen met de snelle veranderingen binnen hun vakgebied en de maatschappij. Het risico van deze aanpak is dat Ehrenfest niet representatief is voor een hele groep natuurwetenschappers. Ehrenfest

² Van Delft, Heike Kamerlingh Onnes (2005)

³ Klein, *Paul Ehrenfest* (1977).

⁴ Na het overlijden van Klein in 2009 verscheen na bemiddeling van Anne Kox wel postuum een hoofdstuk uit de beoogde biografie: Klein, 'Paul Ehrenfest, Niels Bohr, and Albert Einstein: Colleagues and Friends' (2010).

was in veel opzichten atypisch en had vaak heel eigen ideeën. Aan de andere kant is het zo dat Ehrenfest een groot aantal karakteristieke ontwikkelingen binnen de wetenschap, de universiteiten en de maatschappij opmerkte en ter discussie stelde. Hij vond veel dingen belangrijk, en zei ook duidelijk waarom. Dat maakt hem tot een gevoelig meetinstrument voor het opsporen van veranderingen en daarmee gepaard gaande spanningen binnen wetenschap en maatschappij.

Voor de periode 1900-1940 heeft David Baneke een onderzoek uitgevoerd naar de manier waarop wetenschappers en intellectuelen reageerden op de maatschappelijke en culturele problemen van hun tijd. Wetenschappers vroegen zich af welke rol zij te spelen hadden in de veranderende maatschappij. Ik sluit hierbij op een aantal punten aan en gebruik Ehrenfest als vergrootglas voor enkele prangende kwesties van zijn tijd, zoals de vraag of wetenschap nuttig moet zijn, wat de maatschappelijke functie is van universitair onderwijs, en welke onderwijsvormen hier het beste bij passen. Ehrenfest schreef over al deze belangrijke discussies in zijn brieven aan een aantal belangrijke medespelers in de intellectuele debatten. Ook hier zorgde zijn goede netwerk ervoor dat hij met de belangrijkste spelers in contact kwam. Bovendien zal ik laten zien hoe fysici als Ehrenfest zelf ook worstelden om de moderne wetenschappelijke ontwikkelingen een plaats te geven binnen een veranderende onderzoekscultuur. Paul Ehrenfest treedt hier op als tolk van zijn tijd.

Bronnen

Gelukkig is bruikbaar archiefmateriaal in ruime mate beschikbaar. Het Museum Boerhaave te Leiden herbergt een groot Ehrenfestarchief. Het archief werd door bemiddeling van Klein in de jaren zestig door Ehrenfests familie overgedragen, waardoor veel brieven, aantekenboeken en kladversies van artikelen openbaar raadpleegbaar werden voor onderzoekers. Bruce Wheaton ontsloot het archief en stelde een catalogus samen, die in 1977 werd uitgegeven.⁵ Wat niet in de catalogus is opgenomen, zijn de ongeveer vijftig brieven van zeer persoonlijke aard, die ergens in het museum in een doos liggen en die nog niet zijn vrijgegeven. Ik heb helaas niet van dit materiaal gebruik kunnen maken.

⁵ Wheaton, *Catalogue of the Paul Ehrenfest Archive at the Museum Boerhaave Leiden* (1977).

Daarbij moet ook worden opgemerkt dat voor de in dit boek te behandelen periode sprake is van twee gaten in de correspondentie. Het eerste gat betreft de jaren tot begin jaren twintig. In deze periode schreef Ehrenfest zijn brieven met de hand. Daardoor bevat het archief wel de inkomende, maar vaak niet de uitgaande correspondentie – als die wel aanwezig is, is dat vaak in de vorm van een kladversie die Ehrenfest bewaarde. Toch bevat het archief voldoende materiaal voor een helder beeld van deze periode. Van Lorentz en Bohr bijvoorbeeld zijn vrijwel alle inkomende brieven bewaard gebleven. Ergens begin jaren twintig begon Ehrenfest zijn brieven op een typemachine te schrijven, en wel op een *Underwood portable*, die hij op reis kon meenemen. Daarbij maakte hij vaak vier tot vijf doorslagen, ter circulatie onder diverse vrienden, familieleden en collega's.⁶ Vanaf dat moment moet hij ook standaard een doorslag in zijn archief zijn gaan bewaren, waardoor we vanaf dat moment ook beschikken over veel van Ehrenfests brieven. In totaal beslaat het Ehrenfestarchief zo'n 6.000 brieven, verdeeld over 600 verschillende correspondenten, waaronder vrienden en familie, en collega's van over de hele wereld. Helaas ontbreken grote delen van de correspondentie tussen 1914 en 1925; het tweede gat in de correspondentie. Echter, van grote fysici als Bohr, Lorentz, Zeeman, Planck en dergelijke, is uit deze periode wel degelijk volop correspondentie aanwezig in het Ehrenfestarchief, wat voldoende materiaal biedt voor een goed overzicht.

Ondanks deze gaten is het betreffende materiaal zeer omvangrijk, en daarom heb ik ook keuzes moeten maken. Een heel belangrijke keuze was het niet gebruiken van de talloze aantekenboeken die Ehrenfest heeft bijgehouden tijdens zijn leven. Deze bevatten vaak kladberekeningen of kladbrieven, maar voornamelijk losse vragen en aantekeningen, die moeilijk in hun context te duiden zijn. Bij de brieven is dat veel makkelijker, en Ehrenfest draagt juist in zijn brieven zijn hart op de tong. Bovendien is er genoeg ondersteunend materiaal voorhanden.

Waar dat nodig was heb ik Ehrenfests archiefmateriaal aangevuld door te putten uit andere bronnen. Brieven van Ehrenfests vriend Einstein zijn slechts fragmentarisch aanwezig; ik kwam een briefje tegen gericht aan Tatyana Ehrenfest, waarin Helen Dukas haar het verzoek doet om de betreffende correspondentie naar Princeton op te

⁶ P. Ehrenfest aan Bock, 7 maart 1930, APE ESC 1, sectie 5.

sturen, wat gebeurd is. Voor de brieven van Einstein heb ik dankbaar gebruik gemaakt van de *Einstein Papers*. Ook heb ik gebruik gemaakt van de Archives for the History of Quantum Physics. Dit project startte in 1961 met het op microfilm zetten van grote hoeveelheden archiefmateriaal van kopstukken uit de geschiedenis van de quantumfysica. Het bevat onder andere het vrijwel complete Ehrenfestarchief en het Zeemanarchief. De brieven tussen Einstein en Ehrenfest zijn voor een gedeelte opgenomen op een van de microfilms. De microfilms zijn onder andere in de Universiteitsbibliotheek van Utrecht te raadplegen, en in het Museum Boerhaave.

Ehrenfest is zijn brieven aan Lorentz altijd met de hand blijven schrijven, dus voor een blik op wat Ehrenfest zelf schreef aan de man die hij mateloos bewonderde, moest ik een bezoek brengen aan het Lorentzarchief. Daarnaast heb ik nog andere bronnen geraadpleegd, waaronder een omvangrijk restant van Ehrenfests privé-bibliotheek. Ehrenfests publicaties werden – op een enkel Russisch artikel na – in 1959 gebundeld en gepubliceerd door Martin Klein als *Collected scientific papers*.⁷

Als secundair bronnenmateriaal bestaat een internationaal stuwmeer aan publicaties betreffende de geschiedenis van de fysica in de twintigste eeuw. Op het gebied van de Nederlandse fysica verschenen publicaties van Kox, Maas, Heijmans, Flipse, Van Delft, De Jong en Van Lunteren. Daarnaast heb ik dankbaar gebruik gemaakt van een aantal doctoraal/masterscripties over Ehrenfest die zijn verschenen van de hand van respectievelijk Boeyink (over Ehrenfests wetenschappelijke worstelingen tussen 1916 en 1925), Bos (over Ehrenfests internationalisme), Leclercq (over Ehrenfests natuurkunde), en Huijnen (over het leven van Ehrenfest tot 1912). Over dit laatste onderwerp publiceerden Huijnen en Kox tevens samen een artikel, en daarmee hebben zij voor de door hun beschreven periode een substantiële aanvulling geleverd op de biografie van Klein. Wetenschapsjournalist Rispens schreef een populair boek over de relatie van Einstein met Nederland, waarin Ehrenfest een hoofdstuk kreeg toebedeeld.⁸

⁷ Klein, *Paul Ehrenfest. Collected scientific papers* (1959).

⁸ Heijmans, *Wetenschap tussen universiteit en industrie* (1994); Maas, *Atomisme en individualisme* (2001); Van den Bos, *Internationalisering van de natuurkunde* (2002); De Jong en Van Lunteren, 'Fokkers "greep in de verte"' (2003); Huijnen, *'Die Grenze des Pathalogischen'* (2003); Flipse, *'Hier leert de natuur ons zelf den weg'* (2005); Boeyink, *'In het centrum van het drama'* (2005); Delft, *Heike Kamerlingh*

Inhoud

Dit boek bestaat uit acht hoofdstukken, en opent met een biografisch overzicht van Ehrenfests leven. Dit hoofdstuk dient als opmaat voor de rest van het boek, om de inhoud en context van de volgende hoofdstukken te kunnen begrijpen. Ik heb ervoor gekozen om in dit hoofdstuk wat dieper in te gaan op de periode voordat Ehrenfest naar Nederland kwam. Veel van de gebeurtenissen en ontwikkelingen van later datum zijn beter te duiden wanneer we Ehrenfests achtergrond wat beter kennen. Minder ruimte heb ik gereserveerd voor een beschrijving van Ehrenfests leven in de Leidse periode, omdat persoonlijke ontwikkelingen in deze periode ook behandeld worden in de overige hoofdstukken.

De manier waarop Ehrenfest in Leiden het onderwijs grondig vernieuwde en vorm gaf aan zijn eigen onderzoeksschool is het onderwerp van hoofdstuk 2. Hierin poog ik een beeld te geven van de haast obsessieve gedrevenheid waarmee Ehrenfest zich inzette voor het onderwijs en de studenten. Daarnaast wordt de invloed van Ehrenfests onderwijskundige vernieuwingen en zijn nooit aflatende inzet voor het onderwijs op zijn leerlingen onderzocht.

Hoofdstuk 3 behandelt Ehrenfests fysisch onderzoek. Hoewel hij geen ‘grote ontdekkingen’ deed, was zijn onderzoek niet zonder betekenis. Zijn werk verzekerde hem wel degelijk van een plaats in de internationale elite van de theoretische fysica. Vragen die in dit hoofdstuk centraal staan zijn die betreffende de aard en het belang van Ehrenfests eigen onderzoek, en de rol die hij speelde in het internationale wetenschappelijke netwerk.

Hoewel Ehrenfest volop participeerde in de omwentelingen in de fysica die zich in het begin van de eeuw voltrokken, was hij niet onverdeeld enthousiast over alle veranderingen die het jonge vakgebied van de theoretische fysica in deze periode onderging. Hij uitte meermalen zijn twijfels over de veranderende cultuur binnen het vakgebied zoals die zich manifesteerde bij een volgende generatie theoretici. Hierin stond hij echter allerm minst alleen. De toenemende

Onnes (2005); Leclercq, *De adiabatiese hypothese* (2006); Rispen, *Einstein in Nederland* (2006); Huijnen en Kox, ‘Paul Ehrenfest’s Rough Road to Leiden’ (2007); Kox, ‘Hendrik Antoon Lorentz en Paul Ehrenfest’ (2010).

specialisatie binnen het vakgebied, het groeiende publicatietempo en het gebruik van geavanceerde wiskundige technieken door de jongeren brachten ook zijn generatiegenoten veelal tot wanhoop. Ehrenfest verbond deze in zijn ogen schadelijke ontwikkelingen met meer algemene maatschappelijke tendensen in zijn tijd. Deze thematiek vormt het onderwerp van hoofdstuk 4.

Hoofdstuk 5 behandelt Ehrenfests veranderende visie op de rol die de wetenschap diende te spelen in de maatschappij. De relatie tussen academische wetenschap en voor de maatschappij nuttige toepassingen was in het interbellum het onderwerp van hevige debatten. Zoals we zullen zien had Ehrenfest in die discussie een actieve en invloedrijke rol. Hoofdstuk 6 sluit nauw bij het voorgaande hoofdstuk aan. Het gaat in wezen om een specifiek aspect van Ehrenfests visie op maatschappelijke betekenis van de wetenschap. De in dit hoofdstuk beschouwde wetenschap is echter niet de fysica, maar de economie. Ehrenfests economische interesse vertaalde zich gedurende een aantal periodes in concrete onderzoeks- en onderwijsactiviteiten op economisch gebied.

Een ander aspect waarin Ehrenfests engagement zich nadrukkelijk manifesteerde was zijn internationalisme. Ehrenfests grote internationale netwerk komt expliciet aan de orde in hoofdstuk 7. In de eerste plaats wordt in dit hoofdstuk gekeken naar de uiteenlopende manieren waarop hij wetenschappers uit diverse landen met elkaar in contact probeerde te krijgen en te houden. Dit hoofdstuk is weer nauw verweven met hoofdstuk 8, waarin de gevolgen van Ehrenfests sterke internationaliseringsdrang voor de Leidse fysica worden besproken.

Hoofdstuk 1

Biografische schets

*Himmelhoch jauchzend, zum Tode betrübt.*¹

Jeugd

Paul Ehrenfest werd op 18 januari 1880 geboren te Wenen – toen nog onderdeel van de Oostenrijks-Hongaarse dubbelmonarchie.² Zijn ouders, Sigmund Ehrenfest en Johanna Jellinek, waren seculiere joden die vanuit een kleine joodse gemeenschap in Moravië verhuisd waren naar de arbeidersbuurt *Favoriten* in Wenen. Paul was de jongste van tien kinderen, die allemaal moesten helpen in de kruidenierswinkel van hun ouders.³ De zaak liep goed, en alle kinderen kregen een opleiding. De kinderen kregen wel enig onderricht in de joodse religie en in het Hebreeuws, maar de familie hield niet meer vast aan de joodse religie en gebruiken. Wel kreeg de gevoelige Paul al snel te maken met het alomtegenwoordige antisemitisme. De joden kregen de schuld van de financiële ineenstorting van 1873. Schuldpartijen waren aan de orde van de dag, vandaar dat zijn bezorgde vader Paul tot zijn zevende jaar verbood zich alleen op straat te begeven.⁴

Ehrenfests broer Hugo werd arts en emigreerde naar de Verenigde Staten, Otto werd elektrisch ingenieur, en Arthur mechanisch ingenieur. Vooral Arthur, met zijn uitweidingen over techniek en zijn spannende verhalen, kon de kleine Paul boeien. Zijn moeder overleed

¹ Struik over Ehrenfest, in: Struik, *Autobiographical Notes* (1973), hfdst 5, 10. Het citaat is afkomstig uit het gedicht *Klärchens Lied*, van J.W. von Goethe, en betreft een van de eerste omschrijvingen van de manische depressie. Met dank aan Daan Wegener voor de link met Goethe.

² De onderstaande beschrijving van de jaren tot 1912 leunt sterk op: Klein, *Paul Ehrenfest* (1970), en niet minder op: Huijnen, *Die Grenze des Pathologischen* (2003).

³ Klein, *Paul Ehrenfest* (1970) 17-32.

⁴ Klein, *Paul Ehrenfest* (1970) 24-25.

toen hij nog maar tien jaar oud was, waarna zijn kindermeisje Minna de moederrol zou overnemen. Zijn vader hertrouwde later met Johanna's jongere zus Josephine. Het lijkt erop dat Paul Ehrenfest hierna depressieve trekken begon te vertonen. Ehrenfests biograaf Martin Klein schrijft: 'He was often miserable, deeply depressed and at odds with himself and the world'.⁵ De familie verhuisde in die tijd naar het centrum van de stad waar veel welgestelde joden woonden. Sigmund zette daar een pandjeshuis op, wat minder inspanning vergde van hem en zijn gezin. In 1891 werd Paul toegelaten tot het Akademisches Gymnasium. Paul had een warme band met zijn vader, die al overleed toen hij zestien was. Daarna kwam hij onder voogdij van zijn oudste broer Arthur te staan.

Als gevolg van het verlies van zijn vader zakten zijn eerst zo veelbelovende schoolresultaten in. Op school kon de gevoelige en intelligente Paul op weinig begrip rekenen. Einstein zei later dat Ehrenfest in zijn jeugd had geleden onder 'geistige Unterdrückung durch verständnislose und egozentrische Lehrer'.⁶ Arthur had de grootste moeite Paul te overtuigen zijn school niet op te geven. Zijn broers brachten hem een fascinatie voor wiskunde en natuurkunde bij, wat hem uiteindelijk door een moeilijk schooljaar heen sleepte. Nadat hij op zijn zeventiende van school wisselde, verbeterden zijn schoolresultaten. Voor Ehrenfest werd natuurwetenschap zijn baken van troost, zijn religie.

Studie

Op de middelbare school ontmoette Ehrenfest de eveneens joodse Gustav Herglotz. De twee werden vrienden voor het leven. Herglotz deelde Ehrenfests fascinatie voor exacte vakken en ook buiten school bestudeerden ze samen wiskundige problemen. Door zelfstudie raakte Ehrenfest al snel vertrouwd met de natuurwetenschappen. Toen hij in 1899 van het gymnasium af kwam, ging hij aan de *Technische Hochschule* te Wenen studeren. Al snel volgde hij echter ook de colleges aan de universiteit, met scheikunde als specialisatie, maar onder invloed van

⁵ Klein, *Paul Ehrenfest* (1970) 17-32; citaat pagina 34; Huijnen en Kox, 'Paul Ehrenfest's Rough Road to Leiden' (2007) 186-211.

⁶ Einstein, 'Nachruf Paul Ehrenfest' (1934) 96.

Ludwig Boltzmann raakte hij al spoedig in de ban van de theoretische fysica. Boltzmann was op dat moment Oostenrijks meest prestigieuze fysicus. Aan de *Technische Hochschule* leerde Ehrenfest ook Hans Hahn en Heinrich Tietze kennen. Samen met Herglotz, die wiskunde studeerde aan de universiteit, vormden ze de 'onafscheidelijke vier'. Binnen het vriendenclubje werd veel gediscussieerd over wiskunde en natuurwetenschap.

In november 1901 vertrok Ehrenfest voor anderhalf jaar naar Göttingen. Voor studenten in Duitstalige landen was een dergelijk bezoek aan een andere universiteit gebruikelijk. Göttingen trok hem vooral aan door de daar aanwezige privatdocent Johannes Stark, een jonge experimenteel natuurkundige, maar eenmaal daar aangekomen raakte Ehrenfest in de ban van de wiskunde, die vertegenwoordigd werd door de beroemde hoogleraren Felix Klein en David Hilbert. Voor Ehrenfest was Göttingen een ware openbaring. De universiteit had een afwisselend studieaanbod en ademde een internationale sfeer door de aanwezigheid van een groot aantal buitenlandse studenten. Onder zijn medestudenten vond hij veel kameraadschap, en de verwoede natuurwetenschappelijke discussies op de wekelijkse studentenbijeenkomsten spraken hem zeer aan. De principiële Ehrenfest vocht met succes de regel aan die vrouwen uitsloot van de wekelijkse discussieclub voor wiskundestudenten. Daardoor kwam hij in contact met een jonge Russische wiskundige, Tatyana Alexeyevna Afanassjewa uit Sint- Petersburg. Ze was enige jaren ouder dan Ehrenfest. Ze was een sterke, onafhankelijke vrouw en bezat net als Ehrenfest een passie voor de grondslagen van de exacte natuurwetenschappen. Ze had gestudeerd aan de prestigieuze vrouwenuniversiteit van Sint- Petersburg en had een opleiding tot lerares wis- en natuurkunde voltooid. Al binnen een paar maanden na haar komst naar Göttingen namen Paul en Tatyana het besluit om te trouwen. Om deze en andere redenen zouden zijn ervaringen in Göttingen van blijvende invloed zijn op Ehrenfests leven en werk.

In april 1903 bracht Ehrenfest samen met zijn goede vriend Walther Ritz een bezoek aan Leiden. Ehrenfest bleef er tot eind mei. Hij liep college bij Lorentz en bezocht samen met Ritz het laboratorium van Kamerlingh Onnes, waar ze werden rondgeleid door de jonge assistent Crommelin.⁷ In Leiden werkte Ehrenfest aan statistische mechanica en

⁷ Klein, *Paul Ehrenfest* (1970) 45.

bestudeerde hij de klassieke geschriften van Clausius, Maxwell en Boltzmann, gevolgd door de nieuwe werken van Gibbs en de nog onbekende Einstein. Door Lorentz' colleges maakte hij kennis met een voor hem nieuw fenomeen: dat van de straling van een zwart lichaam. Naar aanleiding hiervan begon hij zich in de stralingstheorie van Planck te verdiepen.

Na een kort bezoek aan Leiden in 1903, keerde Ehrenfest terug naar Wenen. Hij rondde zijn studie af en in 1904 promoveerde hij bij Boltzmann.⁸ Kort na Ehrenfests promotie kwam Tatyana naar Wenen om met hem te trouwen. Joden hadden formeel gesproken gelijke burgerrechten, maar werden in de praktijk geweerd uit het ambtelijk apparaat, diplomatie en de hogere juridische kringen. Ook bij posities aan gymnasia en universiteiten werden ze gediscrimineerd. Daarbij was het nog bij wet verboden voor een jood om in het huwelijk te treden met een christen – Tatyana had een Russisch-orthodoxe achtergrond, en om voor de wet te kunnen trouwen was de enige uitweg dat het echtpaar zich onkerkelijk verklaarde. Dat gebeurde, en op 21 december 1904 vond het huwelijk plaats. Het daarop volgende voorjaar vertrokken ze op huwelijksreis naar Rusland en oriënteerden ze zich op een eventuele toekomst aldaar. In oktober werd hun eerste kind geboren.

Aanvankelijk keerden zij terug naar Wenen en daar zette Ehrenfest zijn studie aan de universiteit voort. Hun buitenkerkelijke staat maakte het vooral Tatyana moeilijk om zich in Wenen thuis te voelen. In het voorjaar van 1906 verliet het gezin Wenen. Na een vakantie in Zwitserland reisden ze naar Göttingen. Daar werd Ehrenfest op de hoogte gesteld van het dramatische bericht dat Boltzmann zelfmoord had gepleegd. Ehrenfest schreef een *in memoriam* dat verscheen in het studententijdschrift *Mathematisch-Naturwissenschaftliche Blätter*.⁹ Het is opmerkelijk dat Ehrenfest op het eerste gezicht geen enkele persoonlijke herinnering aan Boltzmann weergaf in zijn necrologie. Door enkel het lezen van deze tekst zou het onmogelijk zijn vast te stellen dat hij Boltzmann persoonlijk gekend had. Ehrenfest maakte de innige relatie met Boltzmann slechts zeer verdekt duidelijk, namelijk door een parallel te trekken met de hechte vriendschappen die Boltzmann op zijn beurt had met zijn eigen leermeesters. Volgens

⁸ P. Ehrenfest, *Die Bewegung starrer Körper in Flüssigkeiten und die Mechanik von Hertz*, proefschrift Wenen (1904); *CSW* 1-75.

⁹ P. Ehrenfest, 'Ludwig Boltzmann' (1906); *CSW* 131-135.

Ehrenfest lag juist dit goede contact tussen leermeester en leerling aan de basis voor Boltzmanns eigen snelle wetenschappelijke ontwikkeling.¹⁰ Boltzmann deed op zijn beurt volgens eigen zeggen alles voor zijn studenten, en verlangde niets minder dan alles van hen terug.¹¹ Ehrenfest beschreef Boltzmanns inventieve wijze om de fysica aanschouwelijk te maken, het effectieve gebruik van makkelijk te begrijpen voorbeelden en de levendigheid waarmee hij de materie presenteerde.¹² Zowel het zeer persoonlijke contact, de tomeloze inzet en veeleisendheid, gecombineerd met levendigheid en aanschouwelijkheid zouden ook de essentiële ingrediënten gaan vormen van Ehrenfests eigen onderwijs in Leiden.

Wellicht was de persoonlijke herinnering aan Boltzmann te confronterend voor Ehrenfest. Boltzmann ging net als Ehrenfest gebukt onder depressies en werd in zijn laatste jaren ook nog eens geplaagd door de angst dat tijdens een college zijn geheugen en verstand hem plotseling in de steek zouden laten. Dit vergalde Boltzmanns professoraat in Leipzig en deed hem wegvlugten naar Wenen. Bovendien meende hij zelf dat hij de laatste jaren van zijn leven een achterhoedegevecht leverde tegen de energeticisten, die meenden dat alle fysische verschijnselen in termen van energie konden worden verklaard en het bestaan van atomen ontkenden. 'Ja, ich möchte sagen, ich bin allein übrig geblieben von denen, die das Alte noch mit voller Seele umfaßten, wenigstens bin ich der einzige, der noch dafür, soweit er es vermag, kämpft.'¹³ De energeticist Ostwald noemde Boltzmann een slachtoffer van de wetenschap; hoe sterker iemand zich wijdde aan de wetenschap, hoe meer kans hij had om tragisch aan zijn einde te komen.¹⁴

Verhuizing naar Rusland

Een wetenschappelijke carrière in de Duitstalige landen kon pas van de grond komen na een habilitatie. Een habilitatie opende de deuren voor een tijdelijke aanstelling. Ehrenfest hoopte in Göttingen te habiliteren,

¹⁰ Klein, *Paul Ehrenfest* (1970) 80.

¹¹ Klein, *Paul Ehrenfest* (1970) 76.

¹² Klein, *Paul Ehrenfest* (1970) 79.

¹³ Klein, *Paul Ehrenfest* (1970) 76; Citaat in: Boltzmann, *Populäre Schriften* (1905) 205.

¹⁴ Klein, *Paul Ehrenfest* (1970) 77; Ostwald, *Grosse Männer* (Leipzig 1909) 401.

maar die mogelijkheid was er niet op dat moment. Tatyana kon ook daar moeilijk aarden en verlangde terug naar haar vaderland. Ehrenfest had haar beloofd dat ze naar Rusland zouden gaan, wanneer Tatyana daar behoefte aan voelde. Toen Tatyana haar baan als onderwijzeres in Sint-Petersburg kon terugkrijgen, sprak ze het verlangen uit terug te gaan. Maar Ehrenfests perspectieven zouden daar niet beter van worden. Voor hem zou het bijna onmogelijk zijn om een carrière op te bouwen in Sint-Petersburg, dat bovendien wetenschappelijk gezien een uithoek van Europa was. Toen na een vertwijfeld bezoek van Ehrenfest aan Tübingen en München duidelijk werd dat ook daar de kans op een habilitatie uiterst gering was, verhuisde het gezin in 1907 naar Sint-Petersburg.¹⁵

Daar maakte Ehrenfest kennis met Abraham F. Joffe, een jonge joodse fysicus die een van zijn beste vrienden zou worden. Joffe was opgeleid als ingenieur aan het Keizerlijk Petersburgs Technologisch Instituut en was daarna in München bij Röntgen gepromoveerd. In 1906 begon Joffe in Sint-Petersburg aan het Polytechnisch Instituut als assistent. De industrialisatie van Rusland stond na de verloren Russisch-Japanse oorlog op een laag pitje, en de academische natuurwetenschap had in het geheel geen contact met de industrie. Ze richtte zich uitsluitend op zuivere wetenschap, en daarbij lag de nadruk vooral op herhaling van eerdere experimenten. Er werd alleen waarde gehecht aan onderwijs en in het geheel niet aan eigen onderzoek.¹⁶ Bovendien was de universiteit zeer bureaucratisch. Ondanks dat Joffe bij Röntgen 'summa cum laude' was gepromoveerd, kwam hij niet in aanmerking voor een universitaire betrekking, omdat hij geen gymnasiumdiploma bezat. Pas na een magisterexamen en een magisterdissertatie kon hij aan een universiteit werken.

Ehrenfests komst werd door Joffe en andere jonge fysici met enthousiasme begroet. Hij had vooruitstrevende ideeën, en had een aantal veelbelovende publicaties op zijn naam staan. Ook zijn buitengewone helderheid werd gewaardeerd. Tatyana bracht het inkomen binnen door haar werk als onderwijzeres aan een meisjesgymnasium. Ondertussen trachtte Ehrenfest zoveel mogelijk bij de universiteit betrokken te raken. Hij kreeg verschillende uitnodigingen voor lezingen, verdiende wat bij door hoorcolleges op schrift te zetten en werd eind 1907 lid van de redactie van het tijdschrift van het Russisch

¹⁵ Huijnen, *Die Grenze des Pathologischen* (2003) 31-33.

¹⁶ Kant, *Abram Fedorovič Ioffe* (1989) 8-21.

fysisch-chemisch genootschap, het *Zhurnal Russkogo Fiziko-Khimicheskogo Obshchestva*. Vanwege het lage peil van de theoretische natuurkunde in Sint-Petersburg zetten Ehrenfest en Joffe in de herfst van 1908 zelf ook een theoretisch fysisch colloquium op, en kwamen iedere zondag doctoraalstudenten bij Ehrenfest thuis referaten houden over de nieuwste ontwikkelingen in de natuurkunde. Daarbij werd door Ehrenfest veel waarde gehecht aan het formuleren van nieuwe vragen en het door discussie steeds scherper krijgen van de mogelijke oplossing daarvan.

Ehrenfest begon zich samen met Joffe voor te bereiden op de magisterexamens van het Polytechnisch Instituut. Ook Ehrenfests Oostenrijkse doctorsgraad was in Rusland niets waard. Ehrenfest had een sterke afkeer van de examens, want ze vereisten een enorme hoeveelheid kennis van de meest uiteenlopende gebieden van de natuurkunde. In 1908 slaagde Ehrenfest voor het examen, maar de dissertatie liet nog op zich wachten. Joffe had geregeld dat Ehrenfest voor het zomersemester van 1909 een cursus mocht geven aan het Polytechnisch Instituut. Ehrenfest bleef er werkzaam tot het wintersemester van 1910.

De korte duur van deze aanstelling was direct gevolg van Ehrenfests eigenzinnigheid. Met zijn vernieuwende colloquia en inspirerende lezingen verzette Ehrenfest zich tegen de verouderde en verstikkende praktijken aan het instituut. In discussies moest men elkaar zonder reserves tegemoet kunnen treden, anders had een discussie volgens hem geen zin. Ehrenfest had dan ook lak aan sociale conventies. Bovendien vond Ehrenfest de examens onzinnig en niet relevant, en hij uitte deze mening ook. Uiteindelijk werd hij in 1910 door een beledigd bestuur ontslagen. Zijn principiële houding had wellicht de enige weg om in Rusland aan een positie te komen geblokkeerd.

De zoektocht naar werk

Lusteloos en niet in staat tot het doen van enig wetenschappelijk werk zocht Ehrenfest zijn heil in het kuuroord van Bad Kissingen, samen met zijn vriend Gustav Herglotz die eveneens depressieve klachten had. De regelmaat van het leven in het kuuroord deed Ehrenfest goed. Ook kon hij afstand nemen van zijn werk. Hij realiseerde zich echter dat zijn depressieve klachten zouden aanhouden zolang hij op wetenschappelijk vlak geen erkenning kreeg door het verwerven van een vaste positie. Hij

constateerde echter dat zijn kansen op een baan in Sint-Petersburg vrijwel tot nul gereduceerd waren. Hij had zich op de universiteit van Sint-Petersburg onmogelijk gemaakt, en bovendien lagen de politieke verhoudingen in Rusland zo dat joden en buitenkerkelijken weinig kans hadden op een vaste positie op een universiteit of hogeschool. Hij schreef aan Tatyana dat hij zo niet kon doorgaan in Rusland. Niet alleen kon hij zich niet ontwikkelen, zonder vaste baan maakte hij zich ook ernstig zorgen om de toekomst van hun kinderen. 'Siehst Du, das ist es, was mich immer so traurig macht, wo Du mich dann immer fragst und glaubst ich verheimliche Dir etwas.'¹⁷ Ehrenfest had tijdens zijn verblijf in Sint-Petersburg wel een aantal artikelen geschreven, en samen met Tatyana werkte hij aan het overzichtsartikel over Boltzmanns werk, maar hij voelde zich afgezonderd van de natuurwetenschappelijke kringen en verstoken van erkenning van zijn wetenschappelijke bijdragen. Toen in juli 1910 zijn tweede dochter Galya werd geboren, was er meer dan ooit behoefte aan een tweede inkomen. Tatyana meende dat Ehrenfest zijn onzekerheid nu maar eens van zich af moest schudden; dan zou hij ook de toekomst van hun kinderen veilig kunnen stellen.¹⁸

Maar er waren bijkomende redenen die het voor Ehrenfest moeilijk maakten in Rusland. Er waren toenemende moeilijkheden in het hoger onderwijs. Door het tsaristische regime werden de intellectuelen onderdrukt en werd er ingegrepen in de autonomie van de universiteiten. Later, na protesten in 1912, verliet zelfs een groot aantal van de professoren de Moskouse universiteit en werd deze gesloten.

Na zijn kuur in augustus 1910 met zijn vriend Herglotz bezochten ze samen Ehrenfests geboortestad Wenen. Daar kwam hij weer in aanraking met het daar aanwezige antisemitisme. Na het bijwonen van een zionistische bijeenkomst raakte hij in de ban van de plannen rond een joodse staat. Bovendien werd hem duidelijk dat er eventueel kansen voor hem lagen bij het oprichten van een natuurkundig instituut in Palestina.

De naar de Verenigde Staten geëmigreerde Hugo Ehrenfest werd in St. Louis hoofd van de afdeling gynaecologie van het joodse ziekenhuis. Daarnaast werkte hij in verschillende privé-klinieken. Hugo analyseerde Paul op basis van zijn herinneringen en de brieven die hij

¹⁷ Ehrenfest aan Tatyana Ehrenfest, 17 augustus 1910, APE EPC 3, sectie 3. Geciteerd in: Huijnen, *Die Grenze des Pathologischen* (2003) 49.

¹⁸ Tatyana Ehrenfest aan Paul Ehrenfest, *zd*, na 30 augustus 1910, APE EPC 3, sectie 4. Zie: Huijnen, *Die Grenze des Pathologischen* (2003) 58.

van hem kreeg. Volgens Hugo leed zijn broer onmiskenbaar aan ‘Psychastenie’, wat leidde tot de neiging tot overmatige precisie en perfectionisme, onzekerheid en angst voor controleverlies. Dit leidde tot twijfelzucht en een wisselende neiging tot controledwang.¹⁹ De sporadische werklust van Paul was volgens Hugo de oorzaak van de symptomen. Hij raadde hem aan een constante werklust te ontwikkelen, wat zou leiden tot een vervullend leven en succes. Hugo hield zijn broer voor dat deze een verplichting had ten opzichte van zijn gezin en de wereld. Het Russische avontuur moest als mislukt worden beschouwd. Door Ehrenfests buitenkerkelijkheid kon hij nooit een baan vinden. Zijn arbeidsvreugde kon zich niet ontwikkelen als er geen arbeid was. Vandaar dat Hugo zijn broer aanraadde om Rusland te verlaten, en gezondheidshalve wel zo snel mogelijk.

Ehrenfest zag wel een toekomst in de Verenigde Staten. Wat hij in de brieven van zijn broer en in de literatuur over Amerika las, stemde hem positief. Uit de atmosfeer van de remmingen, in de atmosfeer van de vooruitgang komen; dat betekende voor hem een verhuizing naar Amerika. Hugo schetste echter een pessimistisch beeld voor zijn broer. Hij was bang dat Paul mentaal te zwak was om het in Amerika te redden. Volgens Hugo was het niveau van de studenten en docenten slecht en Paul zou onderaan moeten beginnen. Zijn broer zou er niet de werkomgeving vinden die hij nodig had.

In de zomer van 1909 had Ehrenfests studievriend Hans Hahn een professoraat in de wiskunde gekregen in Czernowitz, in het meest oostelijk gelegen deel van Oostenrijk-Hongarije. Hij had Ehrenfest meegedeeld dat hij er met open armen zou worden ontvangen en mogelijk zelfs een leerstoel zou kunnen krijgen. Echter, in februari 1911 liet Hahn aan Ehrenfest weten dat diens buitenkerkelijkheid ook hier voor problemen zorgde. Habiliteren was voor buitenkerkelijken geen probleem in Oostenrijk, maar buitenkerkelijken – en joodse afstammelingen – konden een professoraat wel vergeten. Een kans op betaald werk kon hij ook daar wel vergeten. Privaatdocent was het hoogst haalbare.

Daarna dacht Ehrenfest aan Leipzig, waar zijn vriend Herglotz woonde. Toen hij een privaatdocentschap aanvroeg in Leipzig, kreeg hij het teleurstellende bericht dat hij daarvoor in het bezit moest zijn van een

¹⁹ Hugo Ehrenfest aan Paul Ehrenfest, ca. 5 oktober 1910, APE EPC 2, sectie 2. Zie ook: Huijnen, *Die Grenze des Pathologischen* (2003) 53-54.

Duits doctoraat. Vervolgens probeerde hij het in München, bij de theoretisch fysicus Sommerfeld. Omdat hij deze echter nooit had ontmoet, won hij voorzichtig informatie in bij Peter Debye, destijds werkzaam in München. Debye, iets jonger dan Ehrenfest, informeerde bij Sommerfeld of er een vacature was. Sommerfeld wilde echter voorrang geven aan zijn eigen leerlingen en had om die reden nog pas geleden een privaattoecent geweigerd. Maar uit zijn antwoord aan Debye blijkt dat hij desondanks een hoge dunk had van Ehrenfest.²⁰

De academische arbeidsmarkt was in Europa gewoonweg niet groot en weer kwam de VS in beeld. Ehrenfest dacht eraan naar Californië te vertrekken ondanks het eerdere advies van zijn broer. Ehrenfests collega Max Abraham was sterk gekant tegen dit plan. Volgens Abraham waren de studenten daar van belabberde kwaliteit en was er veel te weinig academische vrijheid om als wetenschapper naar tevredenheid te kunnen functioneren.²¹ Toen liet Ehrenfest het idee om naar de Verenigde Staten te gaan voorlopig varen.²² Ondertussen suggereerde Herglotz dat Ehrenfest Sommerfeld zou moeten aanschrijven met de vraag of hij daar mocht habiliteren. Op die manier zou hij alsnog in Leipzig terecht kunnen. Ehrenfest besloot dit advies dan maar op te volgen. Eind september 1911 schreef hij Sommerfeld dat hij in zijn habilitatie het liefste wilde leren hoe hij een echte berekening moest maken. Het enige wat hij kon, schreef hij, kwam tot stand door intuïtieve en kwalitatieve beschouwingen. Hij benadrukte dat deze uitspraak bittere ernst was.²³ Sommerfeld schreef echter terug dat het een beter idee zou zijn om Ehrenfests laatste artikel in de *Annalen der Physik* tot een habilitatie om te vormen.

Op 19 januari 1912 vertrok Ehrenfest voor een reis van vier maanden langs de universiteiten van Duitsland, Oostenrijk-Hongarije en Zwitserland. Na Berlijn en Leipzig – waar het hem duidelijk werd dat een privaattoecentschap er daar voor hem niet in zat – vertrok hij voor een week naar Sommerfeld in München. Daar hing een mogelijk privaattoecentschap in de lucht, aangezien Max von Laue wellicht zou vertrekken als privaattoecent en dit geen positie was die Sommerfeld reserveerde voor zijn eigen studenten. In München las Ehrenfest het

²⁰ Klein, *Paul Ehrenfest*, 167; Debye aan Ehrenfest, 30 mei 1911, APE ESC 3, sectie 3.

²¹ Abraham aan Ehrenfest, 29 mei 1911; 22 juni 1911, APE ESC 1, sectie 1.

²² Klein, *Paul Ehrenfest* (1970) 167.

²³ Klein, *Paul Ehrenfest* (1970) 168-170.

verslag van de eerste Solvay Conferentie over de toenmalige problemen in de quantumtheorie. Zijn net voor de conferentie verschenen artikel, dat de essentiële eigenschappen van de quantumtheorie behandelde, werd niet genoemd. Sterker: Henri Poincaré had blijkbaar dezelfde vraag opgeworpen als Ehrenfest, en erger: hij had hem ook beantwoord in een artikel. Juist dit artikel zou een essentiële rol spelen in de acceptatie van de quantumtheorie. Ehrenfest zonk weer weg in een depressie. Hij vertrok voor enkele dagen naar Zürich, waar hij onder anderen Debye sprak, om daarna door te reizen naar Wenen.²⁴ Na een kort bezoek aan Brunn (Brno) vertrok hij naar Einstein in Praag. Einstein, die slechts kort contact had gehad met Ehrenfest, nodigde hem onmiddellijk uit om bij hem te logeren. Eenmaal in Praag sloten de twee al snel een hechte vriendschap. Einstein zou aan het eind van dat academisch jaar vertrekken naar Zürich, en hij stelde zelfs voor dat Ehrenfest zijn opvolger in Praag zou worden. Volgens Ehrenfest zelf was dit een reële mogelijkheid. De leerstoel werd hem bijna in de schoot geworpen.²⁵ Praag behoorde ook tot Oostenrijk-Hongarije, waardoor Ehrenfest wel een bepaalde geloofsrichting zou moeten opvoeren. Ondanks Einsteins geruststellingen dat het slechts een formaliteit betrof, weigerde Ehrenfest principieel. Na enkele bezoeken in Polen en Rusland keerde hij terug naar Sint-Petersburg. Daar schreef Einstein hem dat hij er alles aan zou doen om Ehrenfest op diens verzoek eventueel ook naar Zürich te halen als privaatdocent. Hij droeg hem met lovende woorden voor als opvolger van Debye.²⁶ Maar wederom wilde Ehrenfest principieel vasthouden aan zijn buitenkerkelijkheid, waardoor hij de positie misliep. Een geïrriteerde Einstein schreef hem: 'Es wurmt mich geradezu, dass Sie den Spleen der Konfessionslosigkeit haben; lassen Sie ihn ihren Kindern zuliebe fallen.'²⁷ Ehrenfest besloot toen maar om zonder baan Einstein naar Zürich achterna te reizen.²⁸ Precies in deze tijd zou Ehrenfests leven radicaal veranderen.

Sommerfeld was Ehrenfest niet vergeten. Privaatdocent Max von Laue was inmiddels vertrokken. Sommerfeld dacht er serieus over om Ehrenfest als privaatdocent aan te stellen. Van zijn leerling Debye, die net in Utrecht tot hoogleraar benoemd was, ontving hij

²⁴ Klein, *Paul Ehrenfest* (1970) 171-174.

²⁵ Huijnen, *Die Grenze des Pathologischen* (2003) 81-82.

²⁶ Klein, *Paul Ehrenfest* (1970) 180.

²⁷ Einstein aan Ehrenfest, 25 april 1912, EP 5, doc. nr. 384.

²⁸ Huijnen, *Die Grenze des Pathologischen* (2003) 83.

waarschuwende woorden. Debye ontraadde Sommerfeld om Ehrenfest aan te stellen als privaattoecent.

‘Wenn Du daran denkst, Dir Ehrenfest zu holen, so kann ich nicht umhin, einige Bedenken zu äussern. Eine Jude, wie er offenbar einer ist, vom “Hohenpriester” typus kann doch mit seiner bestrichenden Talmudlogik einem äusserst schädlichen Einfluss ausüben. Mancher frischer, nicht ganz fertige Gedanke, den man sonst mit frischen Mut äussern würde, kann durch ihn gar zu leicht im Keime erstickt werden.’²⁹

Sommerfeld vroeg vervolgens Röntgen of Ehrenfest in aanmerking kon komen voor het privaattoecentschap. Röntgen antwoordde dat ‘seine Befähigung einen ächt jüdischen Typus habe. Geistreich, kritisch, dialektisch. Meine an Sie zu richtende Frage ist nun die: glauben Sie, dass E. unter Ihrer Leitung und durch Ihren Einfluss zum *Physiker* d.h. zu einem auf physikalischem Gebiet produzierenden Menschen sich ausbildet?’³⁰ Zowel Debye als Röntgen hadden hun twijfels aan Ehrenfest als oorspronkelijk, creatief en vooral productief fysicus.

Desondanks was Sommerfeld geïnteresseerd, en interesse was er ook uit Leiden. Lorentz was op dat moment wellicht de meest gerespecteerde natuurkundige ter wereld. Hij ging echter al geruime tijd gebukt onder een zware onderwijslast. Om die last te verlichten was in 1906 de experimenteel natuurkundige J.P. Kuenen aangesteld als derde hoogleraar. Zijn benoeming was een direct gevolg van de wens om Lorentz tegemoet te komen en zo de druk van aanbiedingen van buitenlandse universiteiten te weerstaan. Desondanks maakte Lorentz in november 1911 kenbaar dat hij zijn gewoon hoogleraarschap wilde laten omzetten in een buitengewoon hoogleraarschap.³¹ Zijn onderwijstaken en organisatorische verplichtingen namen zoveel tijd in beslag dat hij nog maar nauwelijks aan onderzoek toekwam. Hij was al curator van het

²⁹ Van Ginkel, *Debye in 1935-1945* (2006) 95-96. Ehrenfests latere aanstelling in Leiden werden door Debye toegeschreven aan de inspanningen van de – net als Ehrenfest joodse – Einstein. Zie: Jungnickel en McCormmach, *Intellectual mastery of nature 2* (1986) 286-287.

³⁰ Röntgen aan Sommerfeld, 12 april 1912, in: Eckert en Märker, *Arnold Sommerfeld: Wissenschaftliche Briefwechsel I* (2000) 416.

³¹ Notulen Faculteitsvergadering 21 november 1911, UB Leiden, AFA FA, inv. nr. 12.

Fysisch Kabinet van de Teylers Stichting te Haarlem, een speciaal voor hem in het leven geroepen onderzoekspositie. Hij wilde zijn werkplek naar Haarlem verplaatsen, waar hij een eigen laboratorium met assistent had.

Nadat ministeriële toestemming was verkregen, hield Lorentz zich persoonlijk met zijn opvolging bezig. Lorentz informeerde de faculteit dat hij een kandidaat op het oog had, namelijk de rijzende ster, Einstein. Daar deze al in onderhandeling was met Zürich, was het volgens Lorentz zaak direct actie te ondernemen.³² Einstein had echter toen al het aanbod uit Zürich geaccepteerd. Lorentz ging dus op zoek naar een andere kandidaat. De historicus Huijnen stelt dat Einstein zijn vriend Ehrenfest waarschijnlijk aan Lorentz heeft aangeprezen, maar zeker is dat niet.³³ Juist in deze tijd had Ehrenfest aan Lorentz een overdruk gestuurd van zijn alomgeprezen overzichtsartikel over het werk van Boltzmann. Ook Lorentz was er van onder de indruk; in april 1912 sprak hij zijn waardering uit voor het mooie werk van Ehrenfest.³⁴ Lorentz was temeer onder de indruk, omdat hij zelf intensief had nagedacht over de subtiliteiten in het werk van Boltzmann en Gibbs.³⁵ Ehrenfest was bovendien een van de weinige fysici die aan de nieuwe quantumtheorie werkten, naast enkelingen als Einstein, Planck, Jeans, Larmor, Poincaré en Lorentz zelf.³⁶ Lorentz had Ehrenfests artikel uit 1911 over de essentiële kenmerken van de quantumtheorie gelezen en bewonderde Ehrenfests vaardigheid om een zeer complexe theoretische kwestie te ontrafelen.³⁷ Ehrenfest had zich beziggehouden met de statistische mechanica, relativiteitstheorie, de quantumtheorie, thermodynamica en elektronentheorie. Hij had dus niet alleen diepgang, maar was ook nog eens een breed ontwikkeld fysicus, en ook dat werd door Lorentz gewaardeerd. Lorentz meende bijvoorbeeld dat zijn eigen leerling Ornstein te veel was blijven hangen op het onderwerp van de thermodynamica. Bovendien was Ornstein veel pragmatischer dan Ehrenfest en maakte zich weinig zorgen over problemen met betrekking

³² Notulen Faculteitsvergadering 12 februari 1912, UB Leiden, AFA FA, inv. nr. 12.

³³ Huijnen, *Die Grenze des Pathologischen* (2003) 90.

³⁴ Lorentz aan Ehrenfest, 20 april 1912, APE ESC 7, sectie 4.

³⁵ Zie bijvoorbeeld: Kox, 'H.A. Lorentz's contribution to kinetic gas theory' (1990); Kox, 'Boltzmann's influence on H.A. Lorentz' (1993).

³⁶ Kragh, *Quantum generations* (1999) 65.

³⁷ [Van der Waals jr.], 'Stemmen uit de redactie', (1933) 1-5, m.n. 1.

tot de interpretatie van een theorie.³⁸ Lorentz deelde Ehrenfests oog voor de subtiliteiten en de grondslagen van de theoretische fysica.

Lorentz hechtte niet alleen sterk aan goed onderzoek, maar nam het onderwijs ook zeer serieus. Hij maakte veel werk van het onderwijs aan medische studenten, voor wie hij als eerste een fysisch medisch practicum opzette. Hij gaf allerlei nieuwe colleges, zoals elementaire wiskunde voor medici, mechanica voor filosofen en mathematische fysica en differentiaalrekening voor chemici. Ook nam hij jarenlang de colleges van de ziekelijke Kamerlingh Onnes waar. Tevens nam hij veelvuldig zitting in regeringscommissies ten bate van onderwijs hervormingen.³⁹ Desgevraagd liet Sommerfeld aan Lorentz weten wat hij van Ehrenfest als docent vond: 'Er trägt *meisterhaft* vor.' Ehrenfest was gevat, en maakte de wiskunde aanschouwelijk in pakkende beelden. Wiskunde was geen hoofddoel; hij was meer 'logisch' en 'dialectisch'. En Einstein, zo had Sommerfeld gehoord, wil hem in Praag als zijn opvolger. Ook Planck schatte hem in als zijnde 'zeer scherpzinnig'.⁴⁰ Wel probeerde Sommerfeld nog de net in Utrecht benoemde Debye naar voren te schuiven voor Lorentz' positie, maar daar ging Lorentz niet op in. Sommerfeld merkte ook nog op dat Ehrenfest in Praag had kunnen worden aangesteld, ware het niet dat hij zo koppig was geweest niet te willen veinzen religieus te zijn, al had het slechts een formaliteit betroffen.

Lorentz besloot Ehrenfest te polsen nog voordat de voordracht bij de faculteit besproken werd. Wellicht wilde hij zo voorkomen dat Ehrenfest, net als Einstein, voor een andere universiteit zou worden gestrikt; Sommerfeld had Lorentz immers toevertrouwd Ehrenfest nu wel een positie als privatdocent te willen aanbieden. En na de aanbeveling van Einstein zou Praag wellicht ook een reële optie zijn geweest. Aldus schreef Lorentz op 20 april 1912 aan Ehrenfest, die hij in 1906 voor het laatst had geschreven. Lorentz informeerde naar de stand van de fysica in Rusland en tussen neus en lippen door ook hoe het met Ehrenfests carrière ging.⁴¹

Op 16 mei ontving Ehrenfest een brief van Sommerfeld en een tweede brief van Lorentz. Sommerfelds brief arriveerde 's ochtends, en

³⁸ Heijmans, *Wetenschap tussen universiteit en industrie* (1994) 46, 50.

³⁹ Theunissen en Klomp, 'H.A. Lorentz' visie op wetenschap' (1998) 1-14, m.n. 3.

⁴⁰ Sommerfeld aan Lorentz, 24 april 1912, in: Eckert en Märker, *Arnold Sommerfeld: Wissenschaftliche Briefwechsel I* (2000) 417-418.

⁴¹ Klein, *Paul Ehrenfest* (1970) 181-182. (Lorentz aan Ehrenfest, 20 april 1912.)

daarin bood Sommerfeld Ehrenfest het zo fel bevochten privaatschap aan. Sommerfeld had nu reden te meer Ehrenfest te willen, omdat Lorentz immers interesse had getoond; een betere aanbeveling bestond er niet. 's Middags kwam de brief van Lorentz. De werkelijke reden dat hij had geschreven, legde Lorentz uit, was zijn zoektocht naar een opvolger in Leiden. Hij wist niet zeker of men in Leiden een buitenlander zou accepteren, en hij was ook nog niet voorgedragen, maar hij besloot Ehrenfest al zo vroeg op de hoogte stellen van zijn verlangen omdat hij bang was dat Ehrenfest door een andere universiteit zou worden weggekaapt. Of Ehrenfest zo vriendelijk zou willen zijn het aanbod in overweging te nemen?⁴² In een emotionele brief schreef Ehrenfest dat hij het aanbod van een Nederlandse universiteit onvoorwaardelijk zou accepteren, tenzij er een Zwitsers aanbod zou komen, wat hoogst onwaarschijnlijk was. En dan zou hij enkel twijfelen vanwege een eventueel taalprobleem.⁴³

De keuze voor Ehrenfest

De keuze voor Ehrenfest was verrassend. Een buitenlander op een Nederlandse natuurkunde-leerstoel was zonder precedent. De 'vaderlandsche natuurkunde' bloeide als nooit tevoren, en Nederland bezat volgens velen een eigen natuurkundige traditie. Toen de Leidse natuurkundige P.C. Rijke in 1882 met emeritaat ging, stelde deze als opvolger W.C. Röntgen voor als volbloed experimentator naast de theoreticus Lorentz. Lorentz verdedigde indertijd echter de kandidatuur van de meer theoretisch ingestelde Kamerlingh Onnes met het argument dat theorie-geleid experimenteren specifiek Nederlands was, en dat Röntgen al 20 jaar in het buitenland woonde en de aansluiting met de 'vaderlandse natuurkunde' miste.⁴⁴ Die vaderlandse natuurkunde was sindsdien alleen maar krachtiger geworden. En het was zeker niet zo dat Nederland in 1912 geen goede kandidaten kon bieden. Integendeel, afgezien van de eerder genoemde Ornstein, inmiddels lector mathematische fysica in Groningen, en de door Sommerfeld naar voren geschoven Debye, bezat Leiden zelf een uitstekende kandidaat in Willem

⁴² Klein, *Paul Ehrenfest* (1970) 185.

⁴³ Klein, *Paul Ehrenfest* (1970) 187-188.

⁴⁴ Otterspeer en Schuller tot Peursum-Meijer, *Wetenschap en wereldvrede* (1997) 38.

Hendrikus Keesom, sinds 1909 conservator van het Leidse natuurkundige laboratorium. Kamerling Onnes maakte zich eind 1911 nog sterk voor de benoeming van Keesom als hoogleraar in de theoretische natuurkunde in Utrecht.⁴⁵

Een commissie bestaande uit Lorentz, Kamerlingh Onnes en Kuenen droeg drie kandidaten voor: Ehrenfest, Keesom en Ornstein. De laatste twee werden echter alleen genoemd voor 'het geval dat een voordracht van meer dan een persoon gewenscht is'. Debye werd niet genoemd. Lorentz lichtte het rapport toe met de woorden dat Ornstein in Groningen geroemd werd. Maar hij was – waarschijnlijk doelde Lorentz op Ornsteins pragmatische manier van werken – 'een beetje wild', doch wel oorspronkelijker dan Keesom. Keesom werd gekenschetst als uitermate solide en degelijk, en als de theoretische vraagbaak voor een ieder in het lab. 'Ehrenfest echter is superieur', zo benadrukte Lorentz. In de brief aan curatoren moest zeker 'nog bepaaldelijk gewezen worden op het buitengewone van deze vacature, en op het voorrecht iemand als Ehrenfest te kunnen krijgen om de opvolger te worden van den Heer Lorentz.' Dit werd aldus aan de curatoren geschreven.⁴⁶

Voor Ehrenfest begon het lange wachten. Ruim een maand later vroeg hij Lorentz of er niet toevallig een brief zoekgeraakt kon zijn.⁴⁷ Lorentz antwoordde dat hij hoopvol was ten aanzien van Ehrenfests benoeming.⁴⁸ Daarna schreef Lorentz waarom het zo lang duurde: de minister van onderwijs was op vakantie, en die moest officieel zijn goedkeuring geven aan de benoeming.⁴⁹ Ehrenfest had moeite de spanning de baas te blijven. Midden september telegrafeerde hij Lorentz. Deze antwoordde prompt dat er helaas nog geen beslissing was gevallen.⁵⁰ Op 29 september telegrafeerde Lorentz eindelijk het goede nieuws. Ehrenfest was in tranen.⁵¹ In de daaropvolgende brief gaf Lorentz aan dat hij Ehrenfest op alle mogelijke manieren wilde helpen bij

⁴⁵ Snelders, 'De bemoeienissen van Lorentz en Einstein met de Utrechtse leerstoel' (1987) 61-63.

⁴⁶ Notulen Faculteitsvergadering 10 juni 1912, UB Leiden, AFA FA, inv. nr. 12.

⁴⁷ Klein, *Paul Ehrenfest* (1970) 190. (Ehrenfest aan Lorentz, 17 (30) juni 1912.)

⁴⁸ Klein, *Paul Ehrenfest* (1970) 190. (Lorentz aan Ehrenfest, 7 juli 1912.)

⁴⁹ Klein, *Paul Ehrenfest* (1970) 190-191. (Lorentz aan Ehrenfest, 25 juli 1912.)

⁵⁰ Klein, *Paul Ehrenfest* (1970) 191. (Telegram, Lorentz aan Ehrenfest, 22 september 1912.)

⁵¹ Klein, *Paul Ehrenfest* (1970) 191. (Telegram, Lorentz aan Ehrenfest, 29 september 1912.)



Paul Ehrenfest rond 1930.

Archief T.P. van Aardenne, doos 5, NHA; Archief P. Ehrenfest jr.

zijn komst naar Leiden. Hij bood zelfs aan op de kinderen van Ehrenfest te passen terwijl de Ehrenfests een huis zochten. Niets zou hem teveel zijn om Ehrenfest zich thuis te laten voelen in Nederland.⁵² Zo begon een euforische Ehrenfest met zijn gezin op 8 oktober 1912 de reis naar het beloofde land.

⁵² Klein, *Paul Ehrenfest* (1970) 191-192. (Lorentz aan Ehrenfest, 29 september 1912.)

Ehrenfest in Leiden

De Ehrenfests lieten in Leiden een huis bouwen, gebaseerd op bouwtekeningen van Tatyana. Deze woning zou het brandpunt worden van vele intellectuele activiteiten. Studenten waren er kind aan huis, en ook binnen- en buitenlandse geleerden kwamen er veelvuldig over de vloer. Vaak vulde het huis zich dan met muziek. Ehrenfest speelde, net als Planck, piano, Einstein begeleidde graag met de viool en Kramers op de cello. Ehrenfest was bevriend geraakt met de beroemde violist Bursch, die hij bij optredens in Nederland wel van de trein ging halen. Na afloop van een concert bezocht hij hem dan, onder andere met zijn zoon Paul jr., in de kleedkamers.

Ehrenfest had behoefte aan contact met andere geleerden om zijn eigen ideeën aan te scherpen en de nieuwste ontwikkelingen bij te houden. Maar net zo veel contacten deed hij op met gewone mensen, hij bouwde op veel plaatsen vriendschappen op en construeerde zo een internationaal netwerk van wetenschappers dat zijn weerga niet kende. Ehrenfest kon bijzonder goed opschieten met kinderen. Hij nam ze serieus, en kon zich ook moeiteloos in hun geest verplaatsen. In alle ernst beschrijft hij de dankbaarheid die hij voelde toen hij op reis een veertienjarige jongen tegen was gekomen waarmee hij zo goed kon praten, en van wie hij een mooi boek aangeraden had gekregen. De meest pakkende omschrijving komt van de joodse schrijfster Clara Asscher-Pinkhof, die Ehrenfest slechts een paar dagen meemaakte tijdens een vakantie op een waddeneiland: ‘Tussen kleine zevenjarige Fieke en de zwaarbeladen Ehrenfest ontstond een vriendschap, die haar het begrip “vader” duidelijk maakte: niet een portret met een lief gezicht, maar een schouder om op te zitten, met een achteloos handje steunend op zijn ruige kop.’⁵³

Ehrenfests eigen kinderen werden voor die tijd tamelijk vrij opgevoed. Ze werden thuis onderwezen en zouden uiteindelijk ieder op hun eigen wijze in zijn voetsporen treden. Dochter Galinka Ehrenfest rondde in 1928 onder leiding van de pedagoge Philippi – een kennis van Ehrenfest – een tweejarige opleiding tot Montessorionderwijzeres af en werkte enige tijd in de kliniek in Jena waar Ehrenfests jongste, geestelijk gehandicapte zoon Wassily woonde, en op een experimentele school in

⁵³ Asscher-Pinkhof, *Danseres zonder benen* (1984) 103-106.

St. Louis.⁵⁴ Op aanraden van Ehrenfest verzorgde ze vanaf 1928 tekenlessen op de lagere school van de Philipsfabriek te Eindhoven.⁵⁵ Ook ontwikkelde ze materiaal voor het Montessorionderwijs.⁵⁶ Zijn andere dochter Tanja Ehrenfest studeerde wis- en natuurkunde, promoveerde in de wiskunde en voerde de redactie van het beroemde leerboek *Elementare Quantenmechanik* (1930) van Max Born en Pascual Jordan.⁵⁷ Paul jr. werd net als zijn vader fysicus.⁵⁸

Hoewel hij gemakkelijk praatte met de studenten, was zijn band met de Leidse collega's iets stroever. Hij had een goede relatie met Lorentz, die hij respecteerde en bewonderde. Maar tot een echt persoonlijk contact met de vriendelijke maar altijd rustige en ietwat afstandelijke Lorentz kwam het niet. Ook met veel andere Leidse collega's, zoals Kamerlingh Onnes en De Sitter, had Ehrenfest niet echt een innig contact. De relaties waren altijd goed, maar zijn afschuw van formaliteiten, zijn nogal hoekige manier van converseren en zijn afkeer van alcohol en tabak maakten het de temperamentvolle Ehrenfest onmogelijk zich aan te passen aan de Leidse mores. Bij de privatdocent Volgraff en Lorentz' leerlingen Droste en Fokker voelde hij zich meer op zijn gemak. Hij was vooral goed bevriend met de onconventionele Leidse chemicus Backer, later hoogleraar te Groningen, en de eigenzinnige Amsterdamse fysicus en pedagoog Philip Kohnstamm.⁵⁹

Hij reisde veel naar Duitsland en Denemarken – waar belangrijk onderzoek plaatsvond – maar ook naar Amerika en Rusland. Deze laatste twee landen bezocht hij veeleer uit nieuwsgierigheid en warme belangstelling. Op het gebied van de theoretische fysica kon Ehrenfest daar enig zendingswerk verrichten en zich nuttig maken, iets waar hem veel aan gelegen was. Aan de andere kant boeide de industrialisatie en vernieuwende geest die van beide landen uitging hem enorm. In Amerika maakte hij kennis met de moderne jazz, en enthousiast ging hij kijken naar het moderne toneelstuk 'The Green Pastures' – opgevoerd door

⁵⁴ Ehrenfest aan H.J. Backer, 3 september 1928; Ehrenfest aan M. & A. Attwell, 26 mei 1931, EPC 1, sectie 3.

⁵⁵ Ehrenfest aan vrouw en kinderen, 16 november 1928, APE EPC 1, sectie 6.

⁵⁶ Ehrenfest aan Tanja Ehrenfest, 30 maart 1930, APE EPC 1, sectie 7.

⁵⁷ Ehrenfest aan A.B. Föhringer, 4 oktober 1929, APE ESC 4, sectie 3.

⁵⁸ Paul jr. leerde onder andere glasblazen en metaalbewerking op het Kamerlingh Onnes laboratorium. Ehrenfest aan Bock, 7 maart 1930, APE ESC 1, sectie 5.

⁵⁹ Klein, *Paul Ehrenfest* (1970) 200; Klomp, *De relativiteitstheorie in Nederland* (1997) 48.

zwarte Amerikanen, wat toen een unicum was. Amerika was niet de cultuurloze staat zoals nog volop in Europa werd gedacht, maar Ehrenfest huiverde en kon onheilspellende gedachten niet onderdrukken toen hij in Washington langs het twee kilometer lange ministerie van marine wandelde. In Amerika maakte hij in die jaren enkele lange autoritten, zoals begin jaren dertig met zijn student Uhlenbeck. Ehrenfest wilde echter niet dat er sneller dan 40 km/h werd gereden, zeker niet nadat ze met de auto door een hek reden en in een greppel langs de weg belandden. Uiteindelijk leerde hij zelf autorijden, en reed hij in Amerika menig kilometer met een sukkelgangetje, en nooit wanneer het heel druk was.

Ehrenfest liet logerende geleerden de muur van de logeerkamer signeren; nog steeds zijn deze handtekeningen te zien in het huis. Menig beroemd wetenschapper signeerde ook de muur van het Theoretisch Instituut, gevestigd in het Natuurkundig Laboratorium. De vleugel werd later gesloopt, en de handtekeningenmuur tot twee maal toe getransplanteerd naar een nieuwbouwlocatie. In het huidige Kamerlingh Onnes Laboratorium bevindt de muur zich in de hal, geplaatst achter een laag plexiglas.

Vlak na aankomst in Nederland legde Ehrenfest de laatste hand aan een vondst die hijzelf altijd als de meest belangrijke van zijn leven beschouwde: het adiabatisch theorema. Dit theorema zou een belangrijke rol gaan spelen binnen de quantumtheorie. Ook ontplooide Ehrenfest talloze activiteiten die het intellectuele leven op het gebied van de natuurwetenschappen in Leiden een flinke impuls gaven. Desalniettemin was Ehrenfest altijd zeer kritisch over zijn eigen werk en dat van anderen. Naar zijn idee was zijn onderwijs of onderzoek nooit goed genoeg. Colleges werden door hem minutieus voorbereid. Wetenschappelijk werk had bij hem veeleer de vorm van een kritische beschouwing van andermans werk dan van nieuwe, creatieve bijdragen. Op alle fronten bekritiseerde Ehrenfest de wereld om zich heen. Die kritische beschouwingen strekten zich overigens ook uit over andere, buitenwetenschappelijke domeinen als politiek en religie. Studenten en collega's konden uiterst kritisch bejegend worden. Wanneer een student volgens Ehrenfest een bepaalde kwaliteit miste of een eigenschap bezat die nadelig was voor een 'correcte' beoefening van de theoretische fysica, dan werd de betreffende student ruw afgewezen door Ehrenfest. Wetenschap behoorde met volledige toewijding te worden bedreven – Ehrenfest huldigde daarnaast een ascetische leefwijze, waarbij alcohol en

tabak taboe waren. Ook studenten en gasten dienden zich hieraan te houden.

Wanneer we op zoek gaan naar de oorsprong van Ehrenfests strikte levenshouding dan komen we uit bij zijn ideologische denkbeelden, die stammen uit zijn studietijd, rond 1900. In zijn beroemde boek *Op het breukvlak van twee eeuwen* benoemt Romein in het hoofdstuk ‘honderd en een profeten’ een breed scala aan ‘kleine geloven’ die in deze periode bloeiden.⁶⁰ Het ging om een bonte verzameling van bewegingen – ieder voorzien van een eigen profetisch boegbeeld – die zich bezig hielden met zaken als occulte verschijnselen, gezondheidsleer en zelfontplooiing. Het betrof een elitair verschijnsel, dat vrij marginaal was volgens Romein. Marginaal was het echter niet, zoals overtuigend wordt aangetoond door Baneke in zijn studie over het interbellum. De kleine geloven zijn te zien als een onderdeel van een reactie op de problemen van de moderniteit.⁶¹ Ehrenfest was een aanhanger van veel van de door Romein als ‘kleine geloven’ bestempelde stromingen; hij had linkse sympathieën, geheelonthouder en vegetariër. Bovendien was Ehrenfest een bewonderaar van Tolstoi, door Romein met name genoemd als ‘de profet van Jasnaja Poljana’.⁶²

Ehrenfest was in 1903 door Tatyana in aanraking gekomen met Tolstoi. In maart 1912 bezocht Ehrenfest het graf en het huis van de net een jaar eerder overleden schrijver. In Ehrenfests huis in Leiden nam het portret van Tolstoi een prominente plaats in tussen de portretten van geleerden als Boltzmann en Maxwell.⁶³ Tolstoi gaf richting aan een aantal van Ehrenfests ideeën. Het is te eenvoudig om te stellen dat Ehrenfest een bepaalde ideologie aanhing, omdat hij zelf altijd scherp zag aan welke punten het binnen ideologieën schortte – het is correcter om te stellen dat Ehrenfest ondermeer door Tolstoi geïnspireerd werd. Zo was Tolstoi een bekend onderwijshervormer en invloedrijk pedagoog, maar ook een pacifist en voorvechter van niet-gewelddadig verzet. Als anarchist pleitte hij voor het ontworstelen aan de staatsmacht, doch niet door revolutie maar door een regeneratie van de innerlijke mens. Onderdeel hiervan was het streven naar zelf-perfectionering als weg naar blijvend geluk, een ascetische levenswijze en vegetarisme.⁶⁴ Ehrenfest was niet de

⁶⁰ Romein, *Op het breukvlak van twee eeuwen* (1967) 631-651.

⁶¹ Baneke, *Synthetisch denken* (2008) 35-36.

⁶² Romein, *Op het breukvlak van twee eeuwen* (1967) 646.

⁶³ Klein, *Paul Ehrenfest* (1970) 44-46, 179, 204.

⁶⁴ D.T. Orwin, *The Cambridge Companion to Tolstoy* (Cambridge 2002)

enige die zijn heil zocht in alternatieve stromingen. Wiskundigen als Brouwer, Mannoury en de fysicus Ornstein waren actief in de signifi sche beweging, de schrijver-arts Van Eeden stichtte zijn eigen utopische enclave Walden.

Ehrenfests toewijding aan de wetenschap was haast een vervangende religie – een manier om toch enig houvast te hebben in een wereld die volgens hem niet binnen een ideologie of religie kon worden gevangen. Zijn zelfkritiek en zijn eigen onzekerheid op het gebied van de wetenschap waren zeer groot. Voor de toch al onzekere Ehrenfest was het opvolgen van de grote Lorentz een onmogelijke opdracht. Zelfs Einstein bekende huiverig te zijn Lorentz op te volgen: ‘Als mich Lorentz damals rief, empfand ich ein unleugbares Gruseln!’⁶⁵ Nauwelijks was Ehrenfest als opvolger van de beroemdste natuurkundige van die tijd aangesteld, of hij raakte na een kort bezoek aan de energieke, in het Utrechtse laboratorium werkende Debye alweer volledig in een depressie bij de aanblik van Debyes snelle vorderingen daar. Steeds weer twijfelde Ehrenfest aan zijn eigen wetenschappelijke kwalificaties, en hij had voortdurend het idee voorbij gestreefd te worden door Einstein, Debye, Joffe, en anderen. Bovendien meende hij dat, na Einsteins afwijzen van de positie, Lorentz had gekozen voor een tweederangs fysicus. Hij gaf aan Lorentz onverhopen blijk van zijn vrees zijn professoraat te verkwanselen en vroeg hem de eerste drie jaar als een proeftijd te beschouwen.⁶⁶ Dergelijke ontboezemingen zouden in zijn brieven aan Lorentz blijven terugkeren, waarbij Lorentz steeds weer probeerde Ehrenfest gerust te stellen. Zo schreef Lorentz in 1917: ‘Gij hebt Uwe taak met volle toewijding vervuld, een bezielende invloed op de studenten gehad, sleur en routine met goed gevolg bestreden en levendig deelgenomen aan het wetenschappelijk leven in Nederland. Daarbij hebt gij zelf mooi werk geleverd en dat zult gij in de volgende jaren meer kunnen doen, want natuurlijk hebt gij, wat dit betreft, in den eersten tijd in ongunstige omstandigheden verkeerd. Gij zult mij dat alles wel niet geheel toestemmen, maar in elk geval kunt gij het gevoel hebben, zeer Uw best gedaan te hebben. Dat wij dit doen, ieder op de wijze die aan zijn aard en persoonlijkheid het best beantwoordt, is eigenlijk alles wat van ons verlangd kan worden.’⁶⁷ Ehrenfest bleef keer op keer bevestiging zoeken

⁶⁵ Einstein aan Ehrenfest, december 1912; EP 5, doc. nr. 425.

⁶⁶ Klein, *Paul Ehrenfest* (1970) 14–15, 197.

⁶⁷ Lorentz aan Ehrenfest, 8 december 1917, APE ESC 7, sectie 6.

bij Lorentz. Lorentz was in vele opzichten exact het tegenovergestelde van Ehrenfest. Lorentz was bedachtzaam en altijd wat afstandelijk, een ‘ouderwetse professor’ die met zijn studenten geen persoonlijke relatie opbouwde.⁶⁸ De openhartige, emotionele Ehrenfest voelde zich echter opgelucht wanneer hij bij een bezoek aan de kalme en vriendelijke Lorentz zijn problemen had uiteengezet; al pratende verdwenen deze als sneeuw voor de zon. Lorentz raakte bij Ehrenfest, die hem als een soort tweede vader beschouwde, de juiste snaar. Daarbij komt dat de afstandelijke Lorentz toch een zekere warmte en bewondering jegens Ehrenfest moet hebben gekoesterd. Lorentz benijdde Ehrenfests vlotte omgang met studenten, en schaarde zich altijd vierkant achter de vernieuwende ideeën van zijn opvolger. Lorentz las altijd ‘met zichtbaar genoegen’ voor uit de brieven van Ehrenfest.⁶⁹ En toen Lorentz in 1923 officieel met emeritaat ging, en Ehrenfest hem geëmotioneerd een handkus gaf om daarna snikkend de collegezaal te verlaten, schoot zelfs Lorentz een ogenblik vol.⁷⁰

Ehrenfests zelfkritiek werkte verlamdend. Joffe schetste Ehrenfest eens karikaturaal als iemand met een typisch joodse twijfelende houding, die altijd met bijbehorende hand- en lichaamsbewegingen de argumenten ‘enerzijds’ en ‘anderzijds’ bleef afwegen en daardoor geen actie kon ondernemen. Ehrenfest kon dit tot in het extreme doordrijven. Na een discussie haalde Ehrenfest zich de woede van Millikan en Tolman op de hals door op te merken dat een probleem in de regel helemaal geen eenduidige oplossing heeft.⁷¹ Juist voor deze houding hadden Röntgen en Debye gewaarschuwd. Einstein verwoordde het als volgt: ‘Litt er doch unablässig darunter dass sein kritisches Denkvermögen seine konstruktive Fähigkeit überragte; der kritische Sinn beraubte ihn sozusagen der Liebe zu den Kindern des eigenen Geistes, bevor sie geboren wurden.’⁷²

⁶⁸ Kox, ‘Hendrik Antoon Lorentz en Paul Ehrenfest’ (2010) 41.

⁶⁹ W.J. de Haas, ‘Prof.Dr. P. Ehrenfest’, geciteerd in: Kox, ‘Hendrik Antoon Lorentz en Paul Ehrenfest’ (2010) 46.

⁷⁰ Kox, ‘Hendrik Antoon Lorentz en Paul Ehrenfest’ (2010) 51. Hoewel Kox stelt dat Lorentz zich geen raad wist met Ehrenfests emotionele uitbarstingen en hem weinig steun kon bieden, meen ik het tegenovergestelde.

⁷¹ Ehrenfest aan Joffe, 13 april 1928, APE ESC 6, sectie 1.

⁷² Einstein, ‘Nachruf Paul Ehrenfest’ (1934) 95.

Opstapelende problemen

Ehrenfest leed ook tijdens zijn Leidse jaren veelvuldig onder depressieve periodes. In de jaren tot 1923-1924 wordt daar in de correspondentie zo nu en dan wel aan gerefereerd. Maar van de hele Leidse periode lijkt de periode tot halverwege de jaren twintig de meest gelukkigste van zijn leven. Wel zorgde de Eerste Wereldoorlog voor veel opwinding. Ehrenfest maakte zich kwaad over de schanddaden die aan beide zijden werden gepleegd. Hij wilde daarvan afstand nemen door de Nederlandse nationaliteit aan te vragen – iets dat pas na de oorlog lukte. Tijdens de oorlog behoorde Ehrenfest samen met hoogleraren als Huizinga en De Sitter tot een onderdeel van de burgerwacht. Het gezelschap oefende in de duinen bij Katwijk, waarbij Ehrenfest leerde met vuurwapens om te gaan.⁷³ Er was een schrijnend tekort aan assistenten – veel Nederlandse studenten waren onder de wapenen geroepen tijdens de algehele mobilisatie van het leger. Later kwam daar materiaal- en voedselschaarste bij, maar echt ernstige gevolgen heeft dat voor de theoretische afdeling – waar men in principe kon werken met een potloodje en een stuk papier – nooit gehad. Het leven ging door. Ehrenfest had een vaste baan, een behoorlijk salaris, en zijn wetenschappelijk werk en zijn onderwijs leken hem redelijke voldoening te schenken. Rond 1927/1928 lijkt er sprake van een kentering. Daar is een aantal redenen voor aan te wijzen.

Zo kwamen er geldzorgen. In juli 1914 was de door Tatyana ontworpen villa gereedgekomen. Paul en Tatyana hadden hier hun beider erfenissen in gestoken, en tevens was de woning belast met een zware hypotheek. Het huis werd door Ehrenfest als een molensteen om de hals ervaren, maar op zich waren de hypotheeklasten wel te dragen.⁷⁴ De komst van hun jongste kind zou echter veel extra geldzorgen opleveren. In augustus 1918 werd Vassily (Vassik) Ehrenfest geboren. Dit kind bleek geestelijk gehandicapt, en werd na een aantal jaren overgebracht naar een jeugdkliniek in Jena. Dat gebeurde in ieder geval voor 1924.⁷⁵ Per maand moesten de Ehrenfests gemiddeld zo'n 275 Mark

⁷³ Klein, *Paul Ehrenfest* (1970) 298; Röhle, *Willem de Sitter in Leiden* (2007) 261-262.

⁷⁴ Klein, *Paul Ehrenfest* (1970) 203; 206.

⁷⁵ Dat valt op te maken uit een verzoek voor een nieuwe pas voor Vassily. De pas die hij bij zijn aankomst bij zich droeg was in 1924 verlopen. Zie:

betalen voor de verpleging van Vassily.⁷⁶ Om de zaken nog ingewikkelder te maken verloren de Ehrenfests een klein kapitaal door de oorlog en de Russische revolutie.

De financiële situatie dwong Ehrenfest tot het zoeken van bijverdiensten, zoals het afnemen van door hem verfoeide schoolexamens, het geven van betaalde publieke lezingen voor allerlei genootschappen, en vooral ook het veelvuldig houden van colloquia op het NatLab van Philips. Daar kwam nog eens bij dat in de loop der jaren flink op Ehrenfests salaris werd gekort. Ehrenfest verdiende aan het begin van zijn aanstelling 3.380 gulden per jaar, wat in 1927 weliswaar was opgelopen tot 5.880 gulden, maar naar aanleiding van de crisis werd in 1932 zijn salaris met 400 gulden per jaar gekort, het jaar daarop vond nog eens een extra korting van 760 gulden plaats.⁷⁷ Daarmee daalde zijn salaris in 1933 naar 4.720 gulden per jaar; dat salaris had Ehrenfest voor het laatst in 1921 verdiend. Voor de crisis was het, ondanks het zeer bescheiden leven van de Ehrenfests, ook al moeilijk rondkomen. Meermalen moest Ehrenfest bij zijn voormalige assistent, de hoogleraar Adriaan Fokker, forse bedragen lenen.⁷⁸

Een volgende klap voor Ehrenfest was het overlijden van Lorentz op 4 februari 1928. Na de begrafenis lag een aangeslagen Ehrenfest dagenlang met scherpe hoofdpijn te bed.⁷⁹ Hij was zijn raadgever en steunpunt verloren. In een emotionele grafrede verklaarde Ehrenfest: 'En Lorentz blijft in zijn vrome trouw tot het laatst de helper in nood, de verkwikkende trooster in bitter verdriet.'⁸⁰ Lorentz' voortdurende bemoediging van de twijfelende Ehrenfest zorgde er jarenlang voor dat hij niet dieper wegzakte in zijn depressieve periodes. De constante goedkeuring waarin Lorentz voorzag – en waar Ehrenfest zelf voortdurend behoefte aan had – viel nu weg.

Jugendsanatorium Sophienhöhe aan Ehrenfest, 30 september 1932, APE EPC 4, sectie 10.

⁷⁶ Trupers Erziehungsheime und Jugendsanatorium Sophienhöhe aan Ehrenfest, 1 december 1928; Haase aan Tatyana Ehrenfest, 27 juni 1929, APE EPC 4, sectie 10; Ehrenfest aan P. Kapitza, 25 april 1933, APE ESC 6, sectie 4.

⁷⁷ Van het hier weergegeven salaris waren de pensioenbijdragen al afgetrokken. H.A. Lorentz aan Ehrenfest, 7 juli 1912, APE ESC 7, sectie 4; Ministerie van OK&W aan Ehrenfest, 17 februari 1932; 11 januari 1933, APE ESC 8, sectie 5.

⁷⁸ Zie bijvoorbeeld: Ehrenfest aan Fokker, 3 september 1928, 26 mei 1930, APE ESC 4, sectie 5.

⁷⁹ Ehrenfest aan Born, 17 februari 1928, APE ESC 1, sectie 10.

⁸⁰ P. Ehrenfest, 'Grafrede', in: *Physica* 8 (1928) 101-104.

Dit was ook de periode dat Tatyana meer en langer in Rusland verbleef. Ze gaf daar wiskundeonderwijs aan een universiteit, en kwam ieder jaar slechts een paar maanden naar huis.⁸¹ Ehrenfest moest het dus ook zonder de steun van zijn vrouw doen. Bovendien rustte de dagelijkse zorg voor zijn kinderen nu ook op zijn schouders – een taak die Ehrenfest niet licht opvatte. Onverschilligheid kunnen we zijn vrouw niet verwijten. Samenleven met een toenemend depressieve Ehrenfest zal een hele beproeving geweest zijn. De twee echtelieden raakten meer en meer van elkaar vervreemd.

Midden jaren twintig maakte de fysica, Ehrenfests enig overgebleven rots in de branding, een stormachtige ontwikkeling door, waardoor Ehrenfest steeds meer alle contact met de nieuwste fysica begon te verliezen. Zijn toch al schaarse creatieve bijdragen stokten; hun plek werd ingenomen door kritische stukken. De geboren docent bleef zich toelekken op het doceren van de fysica op een inzichtelijke manier. Toen hij de ontwikkelingen zelf niet meer kon begrijpen, was dat tevens de doodsteek voor zijn onderwijs. Bovendien had hij het gevoel dat zijn onderwijstalent hem begon te verlaten. Eind jaren twintig – begin jaren dertig werd Ehrenfest geplaagd door manisch-depressieve periodes. Tijdens die periodes begon hij zich steeds vaker af te zonderen. Ehrenfest luchtte graag zijn hart over zijn problemen, en ook tegen studenten en collega's liet hij zich in deze periode vaak ontvallen dood te willen. Bij Ehrenfest was het echter onduidelijk of hij iets serieus meende of het slechts als discussiepunt opwierp. Alleen een selecte groep nauwe vrienden wist hoe diep Ehrenfest in werkelijkheid wegzonk. Meerdere malen stond hij op de rand van zelfmoord.⁸²

Ehrenfest zocht troost en verlichting. In de jaren 1932-1933 vond hij die bij de tien jaar jongere kunstkritica Nell Posthumus Meyjes.⁸³ Ehrenfest durfde weer te hopen op een toekomst. Hij maakte plannen om van zijn vrouw te scheiden, zijn professoraat vaarwel te zeggen en elders een nieuw leven te beginnen. Maar zoals wel vaker bij Ehrenfest bleef het hierbij; hij kon maar niet besluiten daadwerkelijk te scheiden van zijn vrouw, en bleef piekeren over praktische en financiële details. Ook in dit opzicht bleef hij twijfelen, wat uiteindelijk tot een

⁸¹ Ehrenfest aan M. Attwell, 27 april 1930, APE EPC 1, sectie 3.

⁸² Ehrenfest aan Mrs. Bradley, 15 november 1932; Mrs. Bradley aan Ehrenfest, 28 november 1932, APE EPC 1, sectie 4.

⁸³ Jones, *The Quantum Ten* (2008) 271. Zij hanteert echter een verkeerde spelling van de naam.

breuk met zijn vriendin leidde.⁸⁴ Na deze korte opleving zonk Ehrenfest nog dieper weg.

Het jaar 1933 vormde het sluitstuk van de catastrofale opstapeling van ellende. Begin van dat jaar nam Hitler de macht over in Duitsland. Niet lang hierna volgden massale ontslagen onder joodse wetenschappers. Een enorme hoeveelheid hulpverzoeken uit heel Duitsland bereikte Ehrenfest, die echter vrijwel nooit direct iets kon doen om te helpen. Wegens de situatie in Duitsland liet hij Vassily uit Jena naar een kliniek in Amsterdam overbrengen.

Op 25 september 1933 was Ehrenfest, zoals al vele maanden, stil aan het ontbijt. Hij reisde naar Amsterdam, waar hij eerst in het laboratorium een bezoek bracht aan zijn voormalige student Rutgers. Daarna ging hij naar de kliniek van het Professor Wateringinstituut om Vassily te bezoeken. Ehrenfest en de jongen brachten een ogenblik samen door in de wachtruimte. Daar nam Ehrenfest een revolver uit zijn jaszak en schoot eerst zijn zoon neer en daarna zichzelf. Ehrenfest was op slag dood. Vassily werd in het oog geraakt en leefde nog enkele uren, voordat ook hij overleed.⁸⁵

Ook over zijn zelfmoord bleef Ehrenfest tot het laatst toe twijfelen. Een maand voor zijn dood antwoordde Ehrenfest nog positief op een uitnodiging voor een lezing aan de Volks Universiteit Groningen. Hij gaf aan in januari of februari 1934 nog wel een lezing te kunnen geven. Op 7 september gaf hij nog een titel door voor de lezing. Op de drukproef van de aankondiging van de lezing, gedateerd 16 september 1933 – negen dagen voor zijn dood – heeft Ehrenfest nog correcties aangebracht.⁸⁶ Een jaar eerder had Ehrenfest al afscheidsbrieven geschreven voor zijn vrienden en zijn leerlingen. Daarin schreef hij onder meer dat de dramatische ontwikkelingen binnen de theoretische fysica een belangrijke reden vormden voor zijn zelfmoord.⁸⁷ Omdat hij zijn familie niet wilde opzadelen met de financiële verantwoordelijkheid voor Vassily, zag hij zich gedwongen ook zijn zoon om te brengen.

⁸⁴ Casimir, *Haphazard Reality* (1983) 149.

⁸⁵ Isaacson, *Einstein* (2007) 421.

⁸⁶ Ehrenfest aan B.J.P.F. Kuypers, 23 augustus 1933, 7 september 1933, en de losse drukproef, 16 september 1933, APE ESC 8, sectie 3.

⁸⁷ Ehrenfest aan Bohr, Einstein, Franck, Herglotz, Joffe, Kohnstamm, Tolman, 14 augustus 1932, geciteerd in: Pais, *Niels Bohr's times* (1991) 409-410. Volgens Kohnstamm was de brief pas na Ehrenfests dood bestemd te worden geopend: Kohnstamm, 'Paul Ehrenfest als tolk van dezen tijd' (1952) 425-434, m.n. 426.

Hoofdstuk 2

Onderwijs

*Die große Freude an andere weiterzugeben,
was ich selber begriffen zu haben glaubte,
war, wie Ihr wißt, das eigentliche Rückgrat
meines Lebens.*

Paul Ehrenfest in zijn afscheidsbrief aan zijn vrienden.¹

Deel 1. Ehrenfests vernieuwende onderwijs

Waar men de bekende fysicus George Uhlenbeck ook trof, in zijn werkplek in Utrecht, Ann Arbor of New York, er stond onveranderlijk hetzelfde object op zijn bureau: een foto van een vriendelijk lachende Ehrenfest.² Dit illustreert treffend de diepe bewondering die Ehrenfests studenten voor hem hadden. Zijn warme interesse in hun wel en wee en zijn tomeloze enthousiasme en inzet maakten op hen een blijvende indruk. Ehrenfests maakte iets los onder studenten, zo merkte ook Lorentz al snel na Ehrenfests aankomst in Leiden.

‘Hij heeft in dien korten tijd reeds gedaan gekregen, wat ik gedurende mijn geheele professoraat vergeefs heb nagestreefd. Hij heeft de studenten aan het praten gekregen.’³

Ehrenfest was met zijn toegankelijkheid een vreemde eend in de Leidse bijt. Professoren vormden in Leiden een onbenaderbare klasse. Zelfs de minzame Lorentz hield altijd enige afstand tot zijn leerlingen. Die

¹ Paul Ehrenfest aan vrienden, 14 augustus 1932, geciteerd in: Ph. Kohnstamm, ‘Paul Ehrenfest als tolk van dezen tijd’, in: Ph. Kohnstamm, *Keur uit het didactisch werk* (Groningen 1952; eerste druk 1948) 425-434, m.n. 426. De betreffende brief was bestemd voor opening na Ehrenfests dood.

² Pais, *The Genius of Science* (2000) 293.

³ H.A. Lorentz, geciteerd door J.D. van der Waals, in: [Van der Waals], ‘Stemmen uit de redactie’ (1933) 1-5, m.n. 4.

afstandelijkheid weerspiegelde zich in de cultuur van de Leidse fysica. Er bestond geen geregeld colloquium waarbij studenten, onderzoekers en professoren bij elkaar kwamen om nieuw onderzoek te bespreken. Er bestond geen leeszaal waarin de relevante en recente fysische literatuur bij elkaar stond en waar fysici elkaar konden treffen en samenwerken. Er bestond dus geen echte fysische gemeenschap. Ehrenfest stelde alles in het werk om die vorm te geven.⁴

Ehrenfests komst naar Leiden werd door Lorentz' student Fokker ervaren als een 'bliksemschicht'.⁵ Het was meteen duidelijk dat Ehrenfest een onconventionele hoogleraar was. Hij verkeerde het liefst onder jongeren, om met hen te discussiëren over van alles en nog wat. Hij zocht ook buiten de colleges actief toenadering tot studenten en disputen. Hij bewoog zich graag in studentenkringen en stimuleerde open debatten over natuurwetenschappelijke, maar ook politieke en maatschappelijke vraagstukken. Hij zette zich tot het uiterste in voor studenten, zowel binnen als buiten het onderwijs. Wanneer het om studenten ging, was er voor Ehrenfest geen berg te hoog. Geen wonder dat veel jonge fysici idolaat waren van hun leermeester. Maar aan de andere kant konden Ehrenfests bemoeienissen met een student soms ook te persoonlijk en te vaderlijk worden. Dat leidde soms tot hevige conflicten. Ook wanneer de wetenschappelijke stijl van iemand hem niet aansprak, kon dat leiden tot aanvaringen.

In dit hoofdstuk laat ik zien hoe Ehrenfest het Leidse fysica-onderwijs transformeerde van een degelijke, maar uiterst schoolse studie in een stimulerende onderzoeksgerichte opleiding. Hij moedigde zijn studenten aan om hun eigen individuele krachten optimaal te ontplooiën. Getalenteerde studenten confronteerde hij in een pril stadium met de frontgebieden van het moderne onderzoek. Hij bevorderde samenwerking, discussie en een studieverblijf in het buitenland. En na de studie hielp hij zijn studenten aan onderzoeksposities bij collega's in Nederland of in buitenlandse laboratoria. Om dat allemaal mogelijk te maken was een drastische hervorming van het Leidse natuurkundeonderwijs vereist. Veel van die door Ehrenfest gerealiseerde veranderingen waren gebaseerd op zijn ervaringen met Felix Klein te Göttingen, en op die met Boltzmann te Wenen.⁶ De

⁴ Klein, *Paul Ehrenfest* (1970) 8-9.

⁵ Klein, *Paul Ehrenfest* (1970) 201.

⁶ Klomp, *De relativiteitstheorie in Nederland* (1997) 17.

onderwijshervormingen betaalden zich uit. Zijn promovendi waren zeer succesvol en brachten het bijna allemaal tot het hoogleraarschap. Velen van hen deden cruciale ontdekkingen of droegen in belangrijke mate bij aan de ontwikkeling van de theoretische fysica. Ehrenfest had zo, indirect, een belangrijke invloed op het vakgebied.

Om de betekenis van Ehrenfests onderwijshervorming duidelijk te maken, zal ik een aantal daaraan gerelateerde thema's behandelen. Daarbij zal ik me niet beperken tot het natuurkundige curriculum, maar ook aandacht schenken aan de nieuwe cultuur die hij rond dat onderwijs creëerde. Zo vernieuwde hij het Leidse natuurkundeonderwijs mede door het oprichten van een leeskamer voor studenten. Hij blies het oude dispuut *Christiaan Huygens* nieuw leven in. Door het opzetten van een wekelijks colloquium zorgde hij ervoor dat studenten onmiddellijk aansluiting vonden bij het nieuwste onderzoek, waaraan hij overigens ook in zijn colleges de nodige aandacht besteedde. Voor een goed begrip van zijn hervormingen begin ik met een gedetailleerdere weergave van de manier waarop Ehrenfest zelf onderwijs had genoten en van de pedagogische denkbeelden die ten grondslag lagen aan zijn onderwijsmethodiek.

Pedagogiek en onderzoeksstijl

De manier waarop de natuurkunde wordt onderwezen heeft een grote invloed op het soort fysici dat door dat onderwijs gekweekt wordt. Niet zozeer de leerboeken, als wel de leermeesters zijn een cruciale schakel in het vormingsproces van de wetenschapper.⁷

Andrew Warwick heeft in zijn boek over de negentiende-eeuwse natuurkunde aandacht gevraagd voor de invloed die de didactische methodiek uitoefent op het ontstaan van een bepaald type wetenschapper. In Cambridge werden diverse generaties mathematici en fysici getraind middels een specifieke vorm van onderwijs – gebaseerd op de inzet van zogenaamde 'coaches' die buiten het reguliere onderwijs om studenten drilden in het schriftelijk oplossen van uiteenlopende, ingewikkelde vraagstukken uit de toegepaste wiskunde. Alles draaide om het klaarstomen van studenten voor het beantwoorden van een

⁷ Warwick en Kaiser, 'Kuhn, Foucault, and the Power of Pedagogy' (2005) 393-409.

loodzware serie schriftelijke vragen – de zogenaamde *Mathematical Tripos*, het examen waarmee de bacheloropleiding in Cambridge werd afgesloten. De studenten leerden zo hun wiskundige kennis op allerlei gebieden toe te passen.

In Duitsland werden wiskunde en natuurkunde veeleer theoretisch onderwezen – meer gericht op de algemene theorie en haar interpretatie en betekenis – en niet, zoals in Cambridge, door middel van het uitwerken van concrete problemen.⁸ Daar werd ook niet naar een omvangrijk schriftelijk examen toegewerkt. Concrete voorbeelden of problemen kwamen dan ook slechts sporadisch aan de orde. Resultaat was dat Duitstalige fysici hun vak op een meer kwalitatieve wijze bedreven dan hun vakgenoten in Groot-Brittannië.

In Duitsland vond toetsing, net als in Nederland, vrijwel uitsluitend mondeling plaats. Warwick legt een verband tussen mondelinge tentamens en een brede academische ontwikkeling ('liberal education'). Het onderwijs was aanvankelijk gericht op het afleveren van academici die een nuttige rol binnen de maatschappij zouden kunnen spelen. Academici werden veelal arts, rechter, dominee, politicus, of leraar. De nadruk op schriftelijke examens begon de brede ontwikkeling in Groot-Brittannië van binnenuit uit te hollen; halverwege de negentiende eeuw werden mondelinge examens afgeschilderd als oneerlijk, omdat niet getoetst werd op de puur technische kwaliteiten van de kandidaat.⁹ Eind negentiende eeuw waren schriftelijke examens gebruikelijk in Groot-Brittannië.¹⁰ In Nederland werd tot de jaren dertig in de regel vastgehouden aan mondelinge tentamens. Toen de studentenaantallen drastisch stegen werden schriftelijke tentamens in die jaren noodgedwongen ingevoerd.

Een ander verschil tussen Engeland en Duitsland was dat in Engeland de score van studenten op de *Tripos* het succes van hun toekomstige carrière bepaalde. In Duitsland speelden de competitieve examens geen rol. Daar vond men dat dit soort examens enkel leidde tot het stampen van feiten en formules.¹¹ In Duitsland werd dan ook geen enkel belang gehecht aan hoe goed men de studie had afgerond. Zelfs bezoekende *senior Wranglers* werden er als gewone studenten gezien. Het

⁸ Warwick, *Masters of Theory* (2003) 276.

⁹ Warwick, *Masters of Theory* (2003) 127.

¹⁰ Warwick, *Masters of Theory* (2003) 258.

¹¹ Grattan-Guinness, 'University mathematics at the turn of the century' (1972) 376; Op de middelbare school was het stampen van feiten overigens wel realiteit.

ging er om wat iemand aan *onderzoek* had gedaan.¹² Dat natuurwetenschappelijk onderzoek iets heel anders was dan het oplossen van ingewikkelde wiskundige opgaven, werd in Cambridge echter wel degelijk onderkend. Eind negentiende eeuw kwam steeds meer kritiek op de afwezigheid van de onderzoekscomponent in het onderwijs. Het klaarstomen van studenten voor het beantwoorden van een geavanceerde, doch beperkte serie vraagstukken, wekte steeds meer weerstand op. '[Students are] guided by a pair of rails carefully prepared by the examiner', aldus G.H. Darwin in 1883 in zijn inaugurele rede als Plumian Professor. Maar in het onderzoek ontbraken die rails juist.¹³

In Duitsland werd het wiskunde-onderwijs herzien door onder anderen Felix Klein. Klein bezocht Cambridge in het laatste decennium van de negentiende eeuw en raakte juist in de ban van de daar gehanteerde onderwijsmethode. Volgens Klein was de specifieke probleemoplossende aanpak een buitengewoon belangrijke toevoeging aan de abstracte manier waarop in Duitsland wiskunde en dynamica werd onderwezen.¹⁴ Aan de hand van zijn ervaringen paste Klein zijn seminarium aan, en brak hij met het traditionele onderwijs aan de Duitse universiteiten. Het accent verschoof van het bestuderen, presenteren van en discussiëren over onderzoekspublicaties naar het maken van voorbeeldopgaven. Studenten kregen problemen op, die schriftelijk werden ingeleverd en werden nagekeken door een assistent.¹⁵

Kleins belangrijkste leerling was Arnold Sommerfeld, die zijn methodiek overnam. Bovendien doceerde Sommerfeld jarenlang op een technische hogeschool. Wiskunde werd daardoor voor hem, nog veel meer dan voor Klein, uiteindelijk een middel om problemen op te lossen. Daarmee samenhangend verschoof de nadruk van het mondeling toetsen naar het oplossen van schriftelijke problemen. In München leidde Sommerfeld tijdens colleges vergelijkingen in hun geheel af op het bord,¹⁶ en gaf hij na afloop van ieder college schriftelijke huiswerkopgaven op. De opgaven moesten op het wekelijkse oefenuur (een soort werkcollege) worden ingeleverd, en werden nagekeken door

¹² Grattan-Guinness, 'University mathematics at the turn of the century' (1972) 374.

¹³ Warwick, *Masters of Theory* (2003) 273.

¹⁴ Warwick, *Masters of Theory* (2003) 252-253.

¹⁵ Grattan-Guinness, 'University mathematics at the turn of the century' (1972) 380.

¹⁶ Cassidy, *Uncertainty* (1992) 104.

een assistent.¹⁷ Hoewel de opgaven niet becijferd werden, werden ze wel uitgebreid besproken. Dit moedigde de studenten aan harder te werken. In het geval van Heisenberg bijvoorbeeld, werkte het uiterst kritische commentaar van Sommerfelds assistent Pauli zeer stimulerend.¹⁸ Ook de rivaliteit tussen de goede studenten die door Sommerfeld waren aangetrokken, bevorderde een optimale inzet bij het oplossen van de door hem gestelde problemen.¹⁹

De overgang van mondelinge naar schriftelijke examens veranderde de vaardigheden en eigenschappen van de studenten in Cambridge.²⁰ Sommerfelds nadruk op het schriftelijk oplossen van problemen leverde een geheel andere vorm van onderwijs op dan gebruikelijk in Duitsland. We zullen in de volgende twee hoofdstukken zien dat zijn onderwijs een grote invloed had op de onderzoeksstijl die in het nieuwe onderzoeksgebied van de quantummechanica gebruikelijk zou gaan worden.

De manier waarop Ehrenfest zijn studenten vormde is voor een deel terug te voeren op zijn eigen studie-ervaringen in Duitsland en Oostenrijk. Die waren op diverse punten radicaal anders dan wat aan Nederlandse universiteiten gebruikelijk was, en de introductie van de voor Nederland geheel nieuwe onderwijsvormen had niet alleen belangrijke consequenties voor de vorming van zijn leerlingen, maar ook voor de modernisering van het hele universitaire natuurkundeonderwijs.

Om te beginnen was de sfeer aan de universiteit van Göttingen over het algemeen veel informeler dan die aan de Nederlandse universiteiten, en zeker dan die in Leiden. Voordat een student colleges begon te volgen, bracht hij eerst een bezoekje bij de hooggeleerde thuis. Het was ook gebruik onder de hoogleraren om gedurende het semester studenten voor de lunch of avondeten in huiselijke kring te ontvangen. Daarbij bestonden geen grenzen aan wat kon worden besproken.²¹

Om een doctoraalexamen of promotie af te ronden moesten studenten door een hoogleraar worden uitgenodigd zijn studiegroep bij te wonen. Daar leerden studenten de basisbeginselen van het onderzoek door aan hun eigen project te werken. Studenten werden zo niet

¹⁷ Cassidy, *Uncertainty* (1992) 103.

¹⁸ Cassidy, *Uncertainty* (1992) 108-109.

¹⁹ Cassidy, *Uncertainty* (1992) 107.

²⁰ Warwick, *Masters of Theory* (2003) 114-175, m.n. 115-116.

²¹ Grattan-Guinness, 'University mathematics at the turn of the century' (1972) 369-384, m.n. 375.

blootgesteld aan de vele examens zoals op Amerikaanse of Nederlandse universiteiten. Wel werden ze direct in aanraking gebracht met het doen van zelfstandig onderzoek onder leiding van vakspecialisten. Onder leiding van de hoogleraar schreven ze een dissertatie, hetgeen lesbevoegdheid voor het Gymnasium gaf. Een soort extra promotieonderzoek, de ‘Habilitation’, was nodig om lesbevoegdheid voor de universiteit te verkrijgen.²²

Alles stond in het teken van het zo snel mogelijk klaarstomen van studenten voor het onderzoek. Bekend is dat bijvoorbeeld in München het onderwijsprogramma van Sommerfeld flexibel was, en dat studenten als Heisenberg en Pauli binnen drie jaar konden promoveren door colleges over te slaan. Aan Duitse universiteiten brachten hoogleraren studenten de ideeën, grote lijnen en methoden bij, om hen onmiddellijk daarna of zelfs tegelijkertijd bij het moderne onderzoek te kunnen betrekken. Ook de colloquia van Klein en Sommerfeld waren daarop gericht. Studenten werden zelf in staat geacht eventuele kennishiaten en details aan te vullen.²³ Hoe Ehrenfest concreet invulling gaf aan zijn eigen onderwijsprogramma, en wat voor invloed dit had op zijn studenten, komt in de volgende paragrafen aan de orde.

Leeskamer Bosscha

Een van de eerste vernieuwingen van Ehrenfest in Leiden was het instellen van een leeszaal in het natuurkundig laboratorium. Hoewel de universiteitsbibliotheek uitstekend was uitgerust, bestond er geen plaats waar alle natuurkundige literatuur, zowel standaardwerken als de nieuwste boeken en tijdschriften, bij elkaar gebracht waren. Bovendien waren in Nederlandse universiteitsbibliotheken de boeken niet vrij raadpleegbaar. Al te vaak moest een student eerst een titel opzoeken in de catalogus, vervolgens een kaartje invullen en in een doos deponeren, waarna een bibliotheekmedewerker na een half uur het opgevraagde boek kwam brengen.²⁴

²² Cassidy, *Uncertainty* (1992) 98-99; Grattan-Guinness, ‘University mathematics at the turn of the century’ (1972) 376.

²³ Cassidy, *Uncertainty* (1992) 106-107; Grattan-Guinness, ‘University mathematics at the turn of the century’ (1972) 376.

²⁴ Dold-Samplonius, ‘Interview with Bartel Leendert van der Waerden’ (1997) 313-320, m.n. 315.

In 1880 had Felix Klein de allereerste mathematische leeskamer geïntroduceerd in Leipzig. In 1886 stichtte hij een zelfde leeskamer te Göttingen. Daar waren de boeken vrij raadpleegbaar. Ehrenfest ervoer het als een gemis dat dit in Leiden niet het geval was; als student had hij goede ervaringen opgedaan bij zijn werk in de leeszaal te Göttingen. Speurwerk langs de boekenplanken kon kennisname van andere interessante boeken opleveren, waarvan het bestaan niet vermoed werd.²⁵ Al meteen in zijn eerste jaar als hoogleraar spande Ehrenfest zich in om in Leiden een zelfde leeszaal gerealiseerd te krijgen. Hij wendde zich hiervoor tot Lorentz. Die wist 2.500 gulden voor dit doel te verkrijgen van de vermogende theeplanter K.A.R. Bosscha, zoon van de pas overleden fysicus en curator van de universiteit, Johannes Bosscha. In mei 1913 kon de Leeskamer *Bosscha* worden geopend.

De leeskamer bevond zich in het natuurkundig laboratorium, zodat studenten en wetenschappelijk personeel er gebruik van konden maken. De opzet van de leeskamer was gelijk aan die te Göttingen. Zo werden de boeken niet uitgeleend en was het de bedoeling dat het materiaal ter plekke werd bestudeerd.²⁶ Dat had twee belangrijke voordelen. In de eerste plaats was het materiaal te allen tijde raadpleegbaar. In de tweede plaats bracht het studeren in de leeszaal de natuurkundestudenten bij elkaar. Wanneer er delen afwezig bleken te zijn, kon het gebeuren dat een diep verontwaardigde Ehrenfest de bibliotheek sloot, waarna het dagen kon duren voor hij weer bijtrok.²⁷ De leeskamer had een jaarlijks budget van 1.000 gulden, wat genoeg was om de nieuwste literatuur aan te schaffen.²⁸

De leeszaal groeide uit tot een werk- en ontmoetingsplaats voor alle fysici. Ehrenfest kwam vaak op de leeszaal langs, en studenten met vragen en problemen vonden vrijwel altijd een luisterend oor bij hem. Wanneer zijn fiets tegen de gevel van het lab was geparkeerd wisten de studenten dat ze de hoogleraar in het gebouw konden treffen voor een onderonsje.²⁹

²⁵ Dold-Samplonius, 'Interview with Bartel Leendert van der Waerden' (1997) 313-320, m.n. 315.

²⁶ Klein, *Paul Ehrenfest* (1970) 9-10; Lorentz aan Ehrenfest, 2 juli 1913, APE ESC 7, sectie 4. Over de leeskamer te Göttingen, zie: Frewer, *Das mathematische Lesezimmer der Universität Göttingen* (1979).

²⁷ Casimir, *Haphazard reality* (1983) 76.

²⁸ Ehrenfest aan Lorentz, 9 februari 1921, Lorentzarchief, toegangsnummer 364, inv. nr. 20.

²⁹ R.L. Krans aan Ehrenfest, 25 juli 1930, APE ESC 6, sectie 9.

De studie

De studie natuurkunde bestond uit een kandidaatsfase en een doctoraalfase. De kandidaatsfase duurde formeel twee jaar. Gevolgde vakken werden afgerond met een tentamen. Als een student meende klaar te zijn voor een tentamen maakte hij een afspraak met de betreffende hoogleraar of lector. De tentamens waren vrijwel altijd mondeling en vonden plaats bij de hoogleraar thuis.³⁰ Pas in de jaren dertig steeg het studentenaantal zo dramatisch dat moest worden besloten om schriftelijke tentamens af te nemen op vaste tijden in het collegejaar. Ook was er een practicum. De hoogleraar experimentele natuurkunde was hiermee belast, maar die stak zo min mogelijk geld in het up-to-date houden van de experimenten en de apparatuur. De studenten moesten een serie standaardexperimenten uitvoeren op reeds klaarstaande, vaak verouderde en versleten apparatuur.³¹

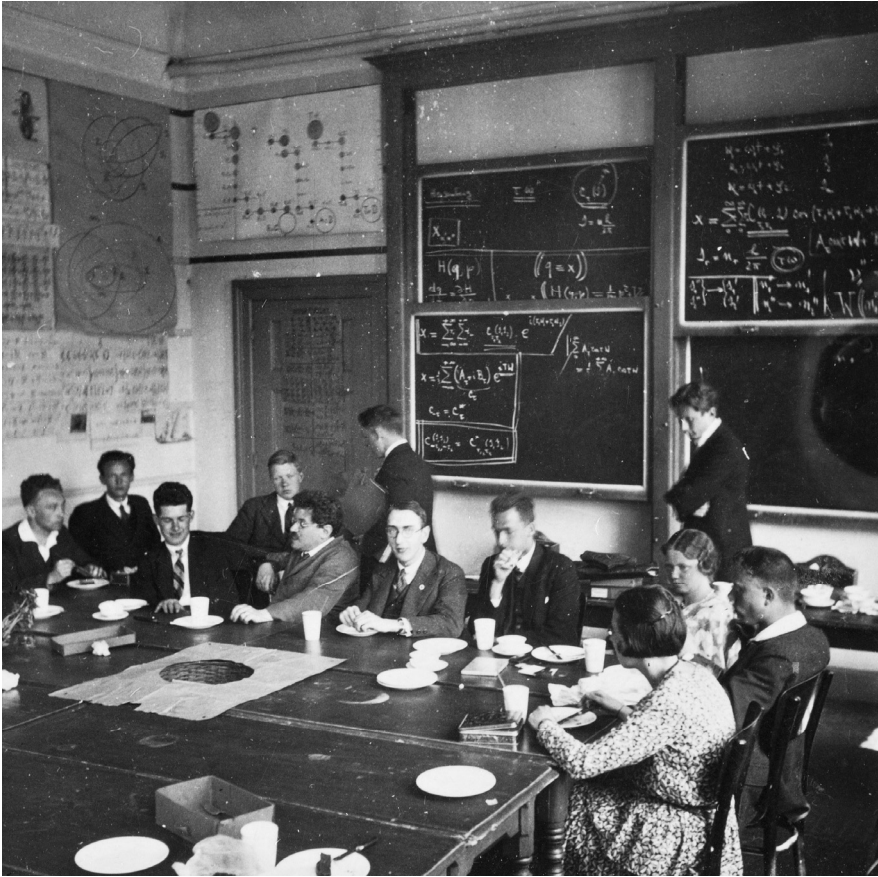
Het natuurkundeonderwijs in Leiden was tamelijk traditioneel, en liet volgens ingewijden te wensen over. Struik zag Kamerlingh Onnes met zichtbare tegenzin zijn laboratorium uitkomen om zijn collegedictaat ‘zo saai mogelijk’ op te lezen om direct daarna weer te vertrekken. Volgens Crommelin – vanaf 1924 onderdirecteur van het laboratorium – waren de colleges van zijn leermeester Kamerlingh Onnes moeilijk te volgen en ook onder vier ogen werd men niet wijzer. De colleges van Onnes’ opvolgers De Haas en Keesom moeten ook niet bepaald aantrekkelijk zijn geweest. De Haas en Keesom staken al hun energie in het onderzoek, en draaiden ongeïnspireerd en routinematig hun colleges af.³²

Ehrenfest zorgde samen met zijn assistent voor een nodige dosis enthousiasme. Het Instituut voor Theoretische Fysica en de leeskamer Bosscha waren voor alle natuurkundestudenten een pied-à-terre. Officieel konden studenten pas na de kandidaatsfase vakken bij Ehrenfest volgen, maar vaak maakten ze bij andere gelegenheden al eerder kennis met hem. Zo had hij op 25 april 1923 samen met enkele studenten *De Leidsche Flesch* opgericht. Dat werd een platform voor voordrachten en discussies,

³⁰ Casimir, *Haphazard reality* (1983) 59, 60; Persoonlijke mededeling van A. Blaauw, 18 september 2008.

³¹ Casimir, *Haphazard reality* (1983) 61-63.

³² Struik, *Autobiographical Notes* (1973), hfdst 5, 12; Van Delft, *Heike Kamerlingh Onnes* (2005) 196-199.



Een bijeenkomst van *De Leidsche Flesch* rond 1925, met Ehrenfest als middelpunt.

Archief T.P. van Aardenne, doos 5, NHA; Archief P. Ehrenfest jr, NHA.

speciaal gericht op de studenten uit de kandidaatsfase. Ehrenfest woonde de bijeenkomsten vaak bij en sprak er ook regelmatig. Zo probeerde hij de studenten te enthousiasmeren voor de (theoretische) natuurkunde.³³ Ouderejaars studenten gaven ook lezingen voor *De Leidsche Flesch*. Ze hadden opdracht om aan Ehrenfest te rapporteren wanneer er zich tussen

³³ Casimir, *Haphazard reality* (1983) 60; Deze beschrijving van het natuurkundeonderwijs en de rol van Ehrenfest daarin wordt onderschreven door A. Blaauw: Persoonlijke mededeling van A. Blaauw, 18 september 2008.

de jongerejaars een talent bevond.³⁴ Ehrenfest vond het belangrijk om zelf ook contact te houden met de onder studenten populaire stromingen. Hij probeerde zich ieder jaar tenminste enkele avonden onder te dompelen in de sfeer van organisaties als de *Nederlandse Christelijke Studenten Vereeniging*, de *Vereeniging voor Studie van het Socialisme*, en het dispuut *Christiaan Huygens*.³⁵

Het sluimerende dispuut *Christiaan Huygens* werd vlak na zijn aankomst in Leiden door Ehrenfest ontdekt. Hij moedigde studenten in de natuurwetenschappen aan er lid van te worden. Zelf woonde hij ook regelmatig de vergaderingen bij, reageerde op discussies of hield een voordracht.³⁶ *Christiaan Huygens* was vooral bestemd voor studenten in de doctoraalfase. De tweewekelijkse bijeenkomsten werden 's avonds gehouden in de woning van één van de studenten. De voordrachten bestonden uit een grote, een geïmproviseerde en een kleine lezing. De sfeer bij zowel *Christiaan Huygens* als *De Leidsche Flesch* was informeel. De bijeenkomsten werden onderbroken voor een hapje en een drankje – zij het dat alcohol uit den boze was.³⁷ Wanneer Ehrenfest in zijn commentaar te fel was, kon de secretaris – of *ab actis* – wel eens wraak nemen door hem de geïmproviseerde voordracht op te dragen, een straf die hij vrolijk onderging. Ehrenfest richtte een aparte bibliotheek op voor de leden van *Christiaan Huygens*, waaraan hij, de hoogleraar sterrenkunde De Sitter en Lorentz boeken en overdrukken doneerden.³⁸ Voor Ehrenfests buitengewone inzet voor het dispuut werd hem tijdens de jaarvergadering van 1915 het erelidmaatschap aangeboden – wat hij onmiddellijk afwees.³⁹ Ehrenfest spoorde zijn studenten ook aan om via *Huygens* contact te zoeken met studenten van andere universiteiten zoals Utrecht en Amsterdam. Dat lukte niet goed vanwege de slechte spoorverbinding en omdat er geen cultuur van interacademiale bijeenkomsten was.⁴⁰

³⁴ Uhlenbeck, 'Reminiscences of Professor Paul Ehrenfest' (1956) 431-433, m.n. 433.

³⁵ Ehrenfest aan C. van Vollenhoven, 14 februari 1918, APE ESC 10, sectie 6.

³⁶ Casimir, *Haphazard reality* (1983) 60-61; Persoonlijke mededeling van A. Blaauw, 18 september 2008.

³⁷ Notulen Dispuut Christiaan Huygens.

³⁸ Notulen Dispuut Christiaan Huygens, 2 november 1914; 7 december 1914; 1 februari 1915, 22 februari 1915.

³⁹ Notulen Dispuut Christiaan Huygens, 15 maart 1915.

⁴⁰ Struik, *Autobiographical Notes* (1973), hfdst 5, 21.

Christiaan Huygens en *De Leidse Flesch* kregen navolging onder andere disciplines. In november 1923 werd de *Leidse Biologen Club* opgericht, en op 20 mei 1926 het *Physisch Chemisch Dispuut* (nu het *Chemisch Dispuut Leiden*).⁴¹ Ehrenfest was ook nauw betrokken bij de oprichting van *Physichem*, het jongerejaarsdispuut voor chemici, op 30 mei 1932.⁴² Oud-Huygensleden waren elders verantwoordelijk voor de oprichting van soortgelijke initiatieven. Toen de jonge astronoom Bart Bok naar Groningen vertrok, richtte hij daar een natuurwetenschappelijk dispuut op in de geest van *Christiaan Huygens*.⁴³ Eerder was er onder invloed van het oud-Huygenslid Coster al een dispuut georganiseerd te Groningen.⁴⁴ De naar Amsterdam vertrokken Rutgers – eveneens ex-Huygens – zette zich daar ook in voor het opzetten van een dispuut en het reorganiseren van de bibliotheek.⁴⁵

Ehrenfest wilde dat studenten ten volle konden deelnemen aan activiteiten bij *De Leidse Flesch*, *Christiaan Huygens* en het colloquium. Maar de studenten waren onderverdeeld in van elkaar geïsoleerde groepen. Bovendien verdween de helft van de studenten voor zonsondergang al in de trein huiswaarts. Deze vele zogenaamde ‘spoorstudenten’ verbleven per dag maar kort op de universiteit en kregen geen echt contact met het intellectuele leven. Ehrenfest benadrukte keer op keer dat eet- en woongelegenheden moesten worden gecreëerd om het verschijnsel van de spoorstudent uit te bannen.⁴⁶ Hij pleitte voor eenvoudige maatregelen als het scheppen van een gelegenheid voor de spoorstudenten om gezamenlijk te kunnen lunchen, wat volgens hem al een belangrijke stap voorwaarts zou betekenen.⁴⁷ Om als student ten volle aan het intellectuele leven aan de universiteit deel te nemen, was huisvesting in Leiden echter een noodzaak, vond hij, en hij stimuleerde dat dan ook. Zo werd Struik door Ehrenfest aangemoedigd om een beurs aan te vragen. Toen Struik deze beurs verkreeg kon hij in

⁴¹ Bron: www.chemischdispuutleiden.nl, www.leidsebiologenclub.nl, geraadpleegd op: 16 februari 2009.

⁴² Dertiende Lustrum Almanak van het Chemisch Dispuut Leiden (1991) 76. Met dank aan Johan Lugtenburg voor de verwijzing.

⁴³ J.J. Raymond jr aan Ehrenfest, 24 april 1929, APE ESC 8, sectie 9.

⁴⁴ W. Thijssen en M. Wolf aan Ehrenfest, 2 april 1928, APE ESC 9, sectie 9.

⁴⁵ A.J. Rutgers aan Ehrenfest, 21 oktober 1930, APE ESC 9, sectie 2.

⁴⁶ Ehrenfest aan Lorentz, 17 juni 1914, 9 februari 1921, Lorentzarchief, toegangsnummer 364, inv. nr. 20; Struik, *Autobiographical Notes* (1973), hfdst 5, 6-7.

⁴⁷ Ehrenfest aan Ph. Idenburg, 4 november 1929, APE ESC 5, sectie 9.

1914 een kamer in Leiden huren.⁴⁸ Ehrenfest regelde aan de overkant van zijn huis een kamer voor de in Arnhem woonachtige Jan Burgers en zijn broer Willy. Burgers kon ook een werkkamer boven in het huis van Ehrenfest gebruiken.⁴⁹

Studenten wiskunde, experimentele natuurkunde en sterrenkunde konden na hun kandidaatsexamen theoretische fysica kiezen als bijvak. Ehrenfest maakte het hen niet al te moeilijk. Studenten volgden de colleges en moesten tentamen bij hem doen. De voor het vak benodigde lesstof werd nog voor de kerstvakantie behandeld, en de studenten die erin slaagden om binnen die tijd ook het tentamen te halen, werden vaderlijk beloond met een chocoladereep. Vandaar dat deze tentamens de bijnaam ‘Kwatta-tentamens’ kregen, naar het in die dagen bekende chocolademerck.⁵⁰ Berucht zijn de verhalen van studenten die door Ehrenfest ruw de deur uit werden gewerkt, omdat ze bij hem thuis op tentamen verschenen met een zweem van parfum. Erger was het toen een nerveuze student verscheen die zichzelf om negen uur ’s ochtends moed had ingedronken met een flinke slok jenever. Na een paar minuten werd hem de deur gewezen, met de mededeling dat hij over een jaar mocht terugkomen.⁵¹ Overigens was het even typisch voor Ehrenfest om voor zijn vrienden een uitzondering te maken. Bohr en Einstein mochten naar hartelust roken als ze bij hem logeerden – zij het enkel in de logeerkamer. Toen de door Ehrenfest hooggeschatte student Casimir een keer per ongeluk geparfumeerd was geraakt na een kappersbezoek, werd hem dat glimlachend vergeven. Ook zijn goede vriend Joffe gebruikte parfum naar hartelust, zonder dat hij daar ooit een onvertogen woord over liet vallen – volgens hem gebruikte Joffe parfum van een meest superieure kwaliteit.⁵²

Wanneer studenten ervoor kozen om theoretische fysica als hoofdvak te volgen werd hij veeleisender. Hij accepteerde slechts een beperkt aantal studenten. Voor een theoretisch fysicus bestond alleen een academische toekomst wanneer hij talent had en inzet toonde; Ehrenfest had aan den lijve ondervonden hoe moeilijk het kon zijn om als theoretisch fysicus een positie te verwerven. Maar het was even belangrijk dat hij met de betreffende student overweg kon. Hij werkte

⁴⁸ Struik, *Autobiographical Notes* (1973), hfdst 5, 6-7.

⁴⁹ Ehrenfest aan J.M. Burgers, 27 augustus 1917, BA.

⁵⁰ Casimir, *Haphazard reality* (1983) 70;

⁵¹ Casimir, *Haphazard reality* (1983) 81-82.

⁵² Casimir, *Haphazard reality* (1983) 78.

nauw samen met zijn studenten. In kleine groepen discussieerden ze over de nieuwste publicaties op het gebied van de quantumtheorie en de relativiteitstheorie. Doel hiervan was om de nieuwste ontwikkelingen te leren begrijpen. Een ouderejaars student kon bovendien assistent bij hem worden.

Colleges

Lorentz was na Ehrenfests komst vertrokken naar Teylers Stichting, maar als buitengewoon hoogleraar bleef hij in Leiden wel regelmatig zijn beroemd geworden ‘maandagmorgen-colleges’ verzorgen. In zijn colleges had zijn betoog altijd het kenmerk van een afgerond en doordacht geheel: systematisch, afgemeten en in goedlopende zinnen, opgebouwd uit stilistisch vlekkeloos Nederlands. Naast zijn gepolijste colleges was hij ook nauwgezet in zijn conversatie, en hij wees diegene die het in zijn hoofd haalde om opmerkingen te maken zonder de zaak eerst grondig te hebben doordacht mild doch resoluut terecht.

Toen Ehrenfest in Leiden zijn opwachting maakte, bleek de tegenstelling tussen Ehrenfest en Lorentz groot. Ehrenfest sprak in een gebrekkig Nederlands dat altijd Duitstalige sporen bleef houden. Hij sprak zeker niet in de schrijftaal van Lorentz. Ehrenfest was uiterst beweeglijk, met weidse gebaren en welklinkende intonatie. Zijn colleges waren levendig, vol van de meest originele metaforen en nooit verstoken van enige geestigheid. Hij behandelde onderwerpen nooit systematisch, maar legde de nadruk op de essentiële punten, waarbij enkel de belangrijkste formules op het bord verschenen. Ehrenfest was een virtuoos in het bordgebruik, iets dat hij van Felix Klein lijkt te hebben geleerd. Hij instrueerde zijn leerlingen ook hoe het bord zo effectief mogelijk te gebruiken was.⁵³ Berekeningen ging hij uit de weg en numerieke constanten werden door hem gezien als volkomen irrelevant voor de kern van het betoog. Hij stimuleerde het stellen van vragen, en gaf zelf het goede voorbeeld door als toehoorder tijdens colloquia studenten of buitenlandse collega's te bestoken met ogenschijnlijk domme vragen.⁵⁴

⁵³ Grattan-Guinness, ‘University mathematics at the turn of the century’ (1972) 381.

⁵⁴ Casimir, ‘Introduction’, in: Klein, *Collected scientific papers* (1959) xi-xii.

Naast Ehrenfest en Lorentz gaf Fokker (voormalig student van Lorentz en van 1917 tot 1919 assistent van Lorentz en Ehrenfest) vanaf 1914 tot 1921 als privaattoecent college in de theoretische natuurkunde. Na een baan aan het gymnasium te Delft, een hoogleraarschap te Delft, en het conservatorschap van het Natuurkundig Kabinet van Teylers Stichting volgde Fokker in 1928 Lorentz op als curator van het Kabinet en werd hij tevens benoemd tot buitengewoon hoogleraar theoretische natuurkunde in Leiden.⁵⁵ Zijn belangstelling lag vooral bij de relativiteitstheorie. Wanneer Ehrenfest op reis was, nam Fokker enkele colleges theoretische fysica waar en ook richtte hij zich incidenteel op quantumproblemen. Hij zat samen met Ehrenfest en de Amsterdamse fysicus Pieter Zeeman in het curatorium van het Lorentz-fonds en had een goed contact met Ehrenfest.⁵⁶ Ook met de sterrenkundigen had Ehrenfest een goed contact. De astronoom J. Woltjer jr. volgde de allernieuwste ontwikkelingen op het gebied van de quantummechanica dank zij Ehrenfests colloquia. Toen Dirac in 1927 bij Ehrenfest verbleef, kwam naast Kramers en Fokker ook Woltjer langs om zich op de hoogte te stellen van de 'letzten drei Diracschen Crossword Puzzels'.⁵⁷ Datzelfde jaar begon Woltjer met het succesvol toepassen van de quantummechanica in zijn artikelen. Ook correspondeerde Woltjer met de in de VS verblijvende Goudsmit. Toen Ehrenfest in 1930 op reis ging naar de VS, nam Woltjer met genoeg enkele colleges quantummechanica over.⁵⁸

Ook De Sitter raakte bekend met de quantummechanica, en niet alleen door het contact met Ehrenfest. Zijn hele loopbaan hield De Sitter zich bezig met onderzoek naar de Jupitermanen, met een enkel uitstapje naar Einsteins speciale en algemene relativiteitstheorie. Hij bleef daarnaast op de hoogte van de basale ontwikkelingen binnen de quantumtheorie door eind 1927, begin 1928 de maandagochtend-colleges van Lorentz bij te wonen.⁵⁹ Lorentz was in die tijd druk bezig met onder andere het Zuiderzeeproject⁶⁰, dus hij kon de snelle ontwikkelingen op

⁵⁵ De Jong, *Fokker en de Formantese* (2001) 13-19.

⁵⁶ Fokker was de zwager van Ehrenfests boezemvriend Kohnstamm.

⁵⁷ Ehrenfest aan Dirac, 16 juni 1927, APE ESC 3, sectie 9.

⁵⁸ Ehrenfest aan Fokker, z.d. [1930], APE ESC 4, sectie 5.

⁵⁹ Archief Willem de Sitter, inv. no. 111. Met dank aan David Baneke voor de informatie en verwijzing.

⁶⁰ De hele zomer van 1926 had Lorentz daarom geen contact met Ehrenfest; Lorentz aan Ehrenfest, 20 september 1926, APE ESC 7, sectie 8. Over Lorentz'

het gebied van de quantumtheorie niet helemaal meer volgen (zie ook hoofdstuk 4), maar hij behandelde op dit college graag de basisprincipes van de quantummechanica en golfmechanica voor de ‘minder ingewijden’.⁶¹ Overigens liet Lorentz zelf weten dat hij enige aspecten van de quantummechanica pas had begrepen na uitleg van Ehrenfest.⁶²

‘Ik heb beproefd voor mij zelf de theorie van Dirac zo duidelijk mogelijk op te schrijven en gij zult zien dat ik, na Uwe toelichting hem nu wel heb begrepen en zijn werk zeer waardeer.’⁶³

Wanneer Lorentz enige opmerkingen over de quantummechanica schreef, hoopte hij het oordeel van Ehrenfest graag te vernemen.⁶⁴

Afgezien van de enkele colleges van Lorentz en Fokker verzorgde Ehrenfest bijna al het onderwijs in de theoretische fysica. In 1916 incorporeerde hij voor het eerst de quantumtheorie in zijn college statistische mechanica. Dit moet wereldwijd een van de allereerste collegereeksen over de quantumtheorie zijn geweest. Pas vijf jaar daarvoor was onder theoretici het inzicht doorgebroken in de fundamentele aard van de quantumproblematiek bij het eerste Solvay-congres in Brussel.⁶⁵ In Ehrenfests college passeerden de nieuwste ontwikkelingen de revue. Niet alleen Bohrs artikelen van drie jaar eerder werden behandeld, maar ook de net vier maanden oude artikelen van Sommerfeld over de fijnstructuur van waterstof, en Ehrenfests eigen werk aan de adiabatische hypothese, die pas een maand na het college werd gepubliceerd.⁶⁶ Ook zorgde Ehrenfest ervoor dat studenten de mogelijkheid kregen om op een onofficieel seminar nieuw verschenen literatuur te lezen en te bediscussiëren onder leiding van een ouderejaars student.⁶⁷ Niet alleen de fysici profiteerden van Ehrenfests bevoegdheid.

rol in het Zuiderzeeproject, zie: Kox, ‘Uit de hand gelopen onderzoek in opdracht’ (2007).

⁶¹ Lorentz aan Ehrenfest, 8 november 1927, APE ESC 7, sectie 9.

⁶² Zie hiervoor o.a.: Lorentz aan Ehrenfest, 22 februari 1926; 3 juni 1927; 4 juli 1927; 24 augustus 1927; 29 augustus 1927; 9 oktober 1927; Ehrenfest aan Lorentz, 26 augustus 1927, APE ESC 7, sectie 8.

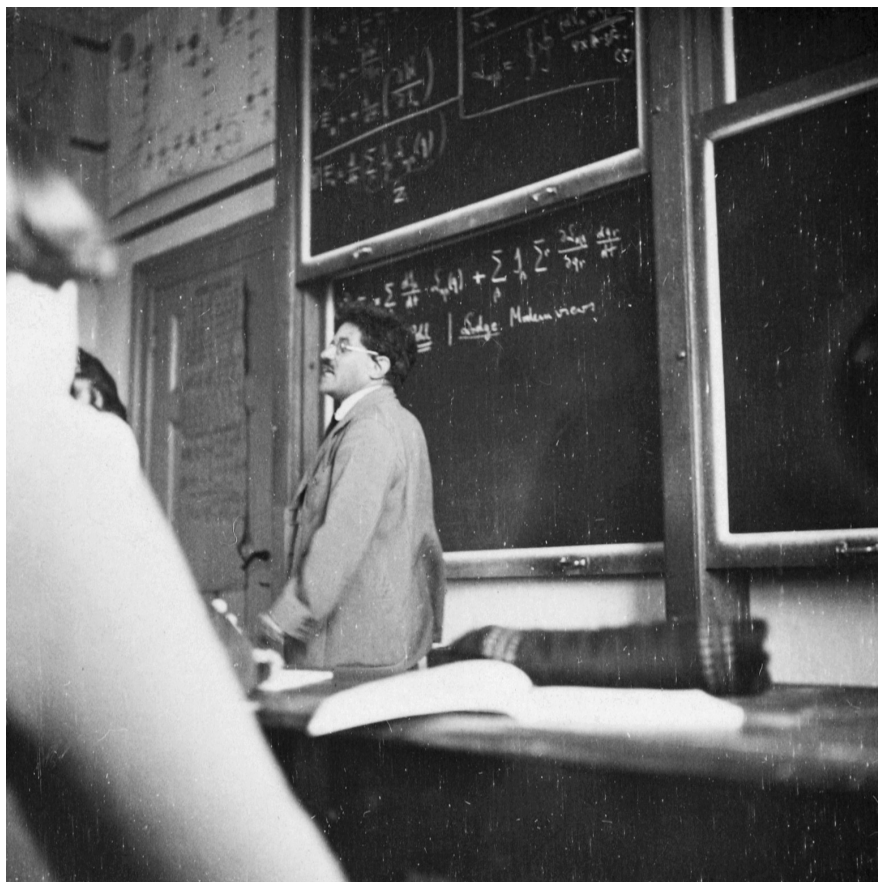
⁶³ Lorentz aan Ehrenfest, 3 juni 1927; 4 juli 1927, APE ESC 7, sectie 8.

⁶⁴ Lorentz aan Ehrenfest, 4 juli 1927, APE ESC 7, sectie 8.

⁶⁵ Klein, ‘Physics in the making in Leiden’ (1989) 29–44, m.n. 34.

⁶⁶ Klein, *Paul Ehrenfest* (1970) 287.

⁶⁷ Casimir, *Haphazard reality* (1983) 60.



Ehrenfest geeft college, ~ 1925.

Archief T.P. van Aardenne, doos 5, NHA; Archief P. Ehrenfest jr, NHA.

In 1932 drong het Chemisch Dispuut Leiden aan op een college Atoomfysica voor chemici. Ehrenfest was hier meteen enthousiast voor, en met zijn medewerking werd dit college opgestart. In 1933 werd het college dank zij steun van het Leidsch Universitair Fonds voortgezet.⁶⁸

Ehrenfest gaf vijf uur college per week.⁶⁹ Het ene jaar werd de elektrodynamische Maxwelltheorie behandeld, uitmondend in Lorentz' elektronentheorie en Einsteins relativiteitstheorie. Het andere jaar gaf hij

⁶⁸ Dertiende Lustrum Almanak van het Chemisch Dispuut Leiden (1991) 76. Met dank aan Johan Lugtenburg voor de verwijzing.

⁶⁹ Zie bijvoorbeeld: *Jaarboek der Rijksuniversiteit te Leiden* (1925) 58-63; *Idem*, (1926) 60-65; *Idem*, (1927) 62-67.

statistische mechanica, uitmondend in de quantumtheorie. De nadruk lag altijd op de onderliggende fysische ideeën en nooit op de wiskundige details. Ehrenfest vermeed lange afleidingen en besteedde uitvoerig aandacht aan de fundamentele aspecten van de theorie, toegelicht met de belangrijkste formules. Ehrenfest had, net als Felix Klein, een voorkeur voor intuïtieve redeneringen, ondersteund met modellen en geometrische beelden, boven een axiomatische, logische uiteenzetting.⁷⁰ Verder gaf hij korte overzichten van verschillende onderwerpen, op smaak gebracht met een paar karakteristieke resultaten en voorzien van referenties. In memoires en interviews van Ehrenfests studenten komen de karakteristieke, Ehrenfestiaanse uitdrukkingen naar voren die spreekwoordelijk zouden worden. Zo pauzeerde hij vaak even om bij een belangrijk resultaat naar zijn toehoorders op te merken: ‘Das ist der springende Punkt.’⁷¹, ‘Und hier, meine Damen und Herren, ist der Moment, wo der Frosch ins Wasser springt’, of: ‘Meine Damen und Herren, dies IST schön.’⁷² Op kenmerkende wijze vatte hij eens de hele elektrodynamica samen in twee differentiaalvergelijkingen, en staande voor twee grote volgeschreven borden verklaarde hij: ‘Je zou toch kunnen vragen wat zou er nou gebeurd zijn als dat minnetje een plusje was; dan zou de snelheid van het licht imaginair zijn. Dan heb je toch de indruk dat je een *skroeffje* te pakken hebt waarmee God de wereld gemaakt heeft.’⁷³

Ehrenfest gaf nooit vraagstukken op. Hij geloofde dat de beste vraagstukken juist die waren waar je zelf opkwam. Wel werden colleges vaak beëindigd met een reeks openstaande vragen in het lopende onderzoek.⁷⁴ Studenten kregen zo een goed overzicht van de belangrijkste resultaten binnen de theoretische fysica en de belangrijke problemen. Ze leerden helder, logisch consistent denken en formuleren. Ehrenfests aanpak had als gevolg dat zijn studenten niet gedisciplineerd en accuraat leerden rekenen, hoewel zijn studenten dat niet echt als

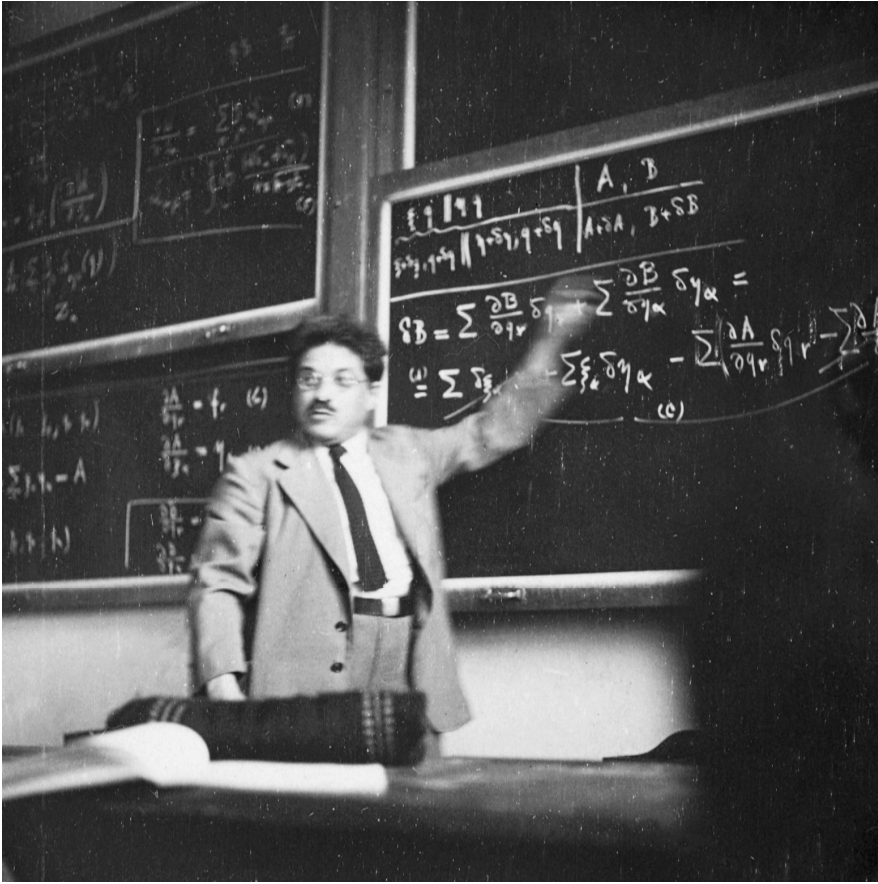
⁷⁰ Pyenson, *The young Einstein* (1985) 216-217.

⁷¹ Casimir, *Haphazard reality* (1983) 68.

⁷² Struik, *Autobiographical Notes* (1973), hfdst 5, 10.

⁷³ Historisch Documentatiecentrum voor het Nederlands Protestantisme, Archief Geschiedenis van de Natuurkunde en Sterrenkunde aan de VU, collectienummer 532, doos 5, inv. nr. 28: werkstuk over en interview met G.J. Sizoo 1987. Met dank aan Ab Flipse voor de informatie en de verwijzing.

⁷⁴ Uhlenbeck, ‘Reminiscences of Professor Paul Ehrenfest’ (1956) 431-433, m.n. 432.



Archief T.P. van Aardenne, doos 5, NHA; Archief P. Ehrenfest jr, NHA.

nadeel schijnen te hebben gezien.⁷⁵ Tussen de colleges door werden ook toepassingen besproken, zoals de berekening van soortelijke warmten of recent werk aan de dielektrische constanten van gassen. Sommige van deze toepassingen liet Ehrenfest door studenten presenteren.⁷⁶ Hij slaagde erin om overeenkomsten te laten zien tussen theorieën die historisch niet verwant waren, zoals groepentheorie en relativiteit, niet-euclidische en projectieve geometrie – iets dat hij in Göttingen van Felix Klein had geleerd. Ehrenfest doceerde de natuurwetenschap als een

⁷⁵ Uhlenbeck, 'Reminiscences of Professor Paul Ehrenfest' (1956) 431-433, m.n. 432; Casimir, *Haphazard reality* (1983) 72.

⁷⁶ Klein, 'Physics in the making in Leiden' (1989) 29-44, m.n. 33.

eenheid.⁷⁷ Dat was zijn grote kracht; Einstein bijvoorbeeld was nooit een groot docent en kon een lezingenserie nooit presenteren als een organisch geheel.⁷⁸ Ehrenfest legde verbanden tussen gebieden die voor de studenten tot dan toe tamelijk disjunct leken. Ook de studenten Almanak prees dit aspect van zijn onderwijs: men leerde de natuurkunde beschouwen ‘als een levend organisme en niet als een dood, hoewel stijlvol geheel’.⁷⁹

Wanneer Ehrenfest een talent had gesignaleerd onder de studenten, vroeg hij die vaak om te fungeren als zijn assistent. Studenten die zich wilden specialiseren in de theoretische natuurkunde werkten nauw met hem samen aan de nieuwste problemen. Ze verzorgden ook voordrachten op colleges en voor *De Leidsche Flesch* en *Christiaan Huygens*. Verder werden ze gestimuleerd om zelf te werken en de laatste ontwikkelingen bij te houden en te verwerken in de leeszaal. Vandaar dat Ehrenfest het voor Casimir, een student waarvan hij hoge verwachtingen had, zelfs niet nodig achtte om colleges bij te wonen. Hij hoefde zelfs geen tentamens te doen. Alles was gericht op het werken aan de nieuwste problemen.⁸⁰ Er wordt zelfs wel beweerd dat Ehrenfest zo gericht was op het onderzoek, dat hij zijn goede studenten zelfs nooit een doctoralexamen liet doen, maar meteen liet doorstomen naar hun promotie.⁸¹ Deze claim moet berusten op een misverstand. De bron voor deze bewering, Ehrenfests student George Uhlenbeck, heeft net als al zijn andere studenten gewoon doctoraal gedaan. Dat was een facultaire aangelegenheid. Bovendien was het doctoraal wettelijk verplicht voor de lesbevoegdheid voor de middelbare school, en het onderwijs was nog steeds het meest gebruikelijke beroepsperspectief voor fysici.

Hoewel Ehrenfest uiterst veeleisend was, verlangde hij niet alleen maar toewijding aan de natuurkunde. Struik volgde met zijn goedkeuring bijvoorbeeld de colleges van de staatshuishoudkundige Van Blom – een van de weinige andere professoren die, net als Ehrenfest, discussieerde met studenten en hen op gelijke voet behandelde.⁸² Wat Ehrenfest wel tegenstond was het elitaire studentencorps en de ledigheid

⁷⁷ Struik, *Autobiographical Notes* (1973), hfdst 5, 11.

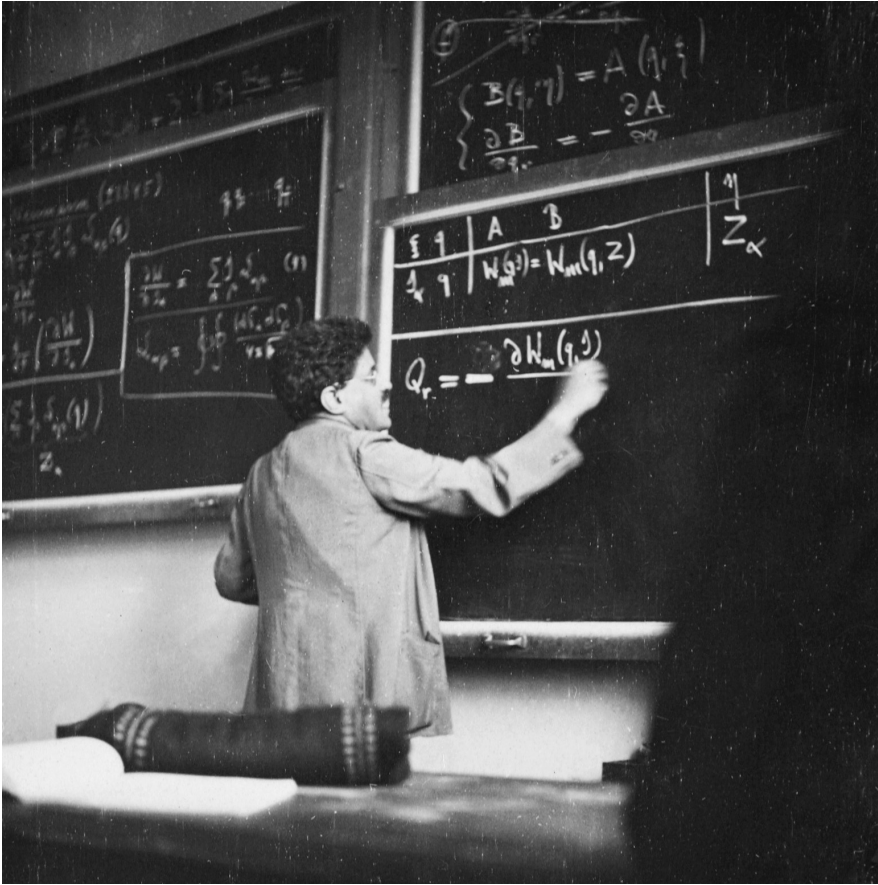
⁷⁸ Loria, ‘Einstein and education’ (1979) 215-227, m.n. 225.

⁷⁹ *Almanak van het Leidsch Studentencorps* (1916) 115.

⁸⁰ Casimir, *Haphazard reality* (1983) 75.

⁸¹ Dresden, *H.A. Kramers* (1987) 94; Dresden had het gegeven van Uhlenbeck vernomen tijdens een interview op 20 september 1975.

⁸² Struik, *Autobiographical Notes* (1973), hfdst 5, 12-13.



Archief T.P. van Aardenne, doos 5, NHA; Archief P. Ehrenfest jr, NHA.

van een studentenleven gevuld met kroegjool. Met succes wist hij Kramers te overtuigen het corps te verlaten en in plaats daarvan lid te worden van *Christiaan Huygens*. Hij liet studenten ook samen werken aan bepaalde onderwerpen. Zo droeg hij Struik tijdens de oorlogsjaren op om samen met een andere student de groepentheorie (waarmee Ehrenfest onder invloed van Felix Klein in contact was gekomen) te bestuderen.⁸³

De nadruk lag op interactie met de studenten. Toen de studenten bij zijn eerste inleidende college vlijtig alles wat hij zei begonnen op te schrijven, sommeerde hij ze hun potloden neer te leggen en hem aan te

⁸³ Struik, *Autobiographical Notes* (1973), hfdst 5, 11.

kijken. Zo konden studenten en hoogleraar met elkaar spreken.⁸⁴ Al na twee maanden probeerde Ehrenfest de colleges in het Nederlands te geven. Hij liet studenten lijsten aanleggen van de ergste Germanismen. Voorlopig durfde hij het door hem gesproken product nog geen Nederlands te noemen, om, zoals hij opmerkte, Lorentz niet wederom een ironisch lachen te ontlokken.⁸⁵

Naast zijn colleges hield Ehrenfest veel populaire lezingen. Er wordt wel gezegd dat de quantummechanica in de jaren twintig weinig publieke interesse opwekte.⁸⁶ Wellicht was dat zo in het buitenland, maar in Nederland in ieder geval niet. Ehrenfest was een veelgevraagd spreker voor diverse natuurwetenschappelijke genootschappen, waar zijn sprankelende voordrachten altijd goed bevielen. Veelvuldig hield hij lezingen voor bijvoorbeeld het bekende Diligentia te Den Haag, het Natuurkundig Genootschap te Leeuwarden, Natuurkundig Genootschap “Wessel Knoops” te Arnhem, het Natuurkundig Genootschap te Groningen, de Groningse Natuurphilosophische Faculteitsvereniging, de Volks Universiteit Groningen, het Natuurkundig Genootschap te Nijmegen, het Natuurkundig Genootschap te Middelburg, het Natuurkundig Gezelschap Utrecht, en Natuurkundig Gezelschap “Ars Aemula Naturae” te Tiel.⁸⁷ Ehrenfest verklaarde een enkele keer wel dat hij dit soort voordrachten alleen maar hield om de broodnodige bijverdiensten die ze hem verschaften.⁸⁸ Maar als geboren leraar hield hij er ook van om dit soort lezingen te verzorgen. Wanneer hij iets doceerde, was hij in zijn element. Net als in zijn colleges stak hij ook in zijn populaire voordrachten veel energie. Overigens vond hij het ook zijn plicht om niet-betaalde lezingen te houden, omdat hij het verwerpelijk vond om zijn kennis alleen maar ter beschikking te stellen aan betalend

⁸⁴ Ehrenfest aan Lorentz, 5 december 1912, Lorentzarchief, toegangsnummer 364, inv. nr. 20.

⁸⁵ Ehrenfest aan Lorentz, februari 1913, APE ESC 7, sectie 4.

⁸⁶ Kragh, *Quantum generations* (1999) 169; Volgens Kragh schreef alleen Eddington in de jaren twintig populaire verhandelingen over de quantummechanica. Van Ehrenfest verschenen in die tijd echter diverse lezingen in druk, van de bij Diligentia gehouden voordrachten.

⁸⁷ Ehrenfest, aantekeningen voor een voordracht voor Diligentia, 8 november 1929: *Waarschijnlijkheidsgolven als bestuurders van photonen, elektronen en protonen*, APE ESC 3, sectie 7; E. Hardenberg aan Ehrenfest, 21 september 1929, E.

Hardenberg aan Ehrenfest, 9 juli 1930, 5 juli 1931; Ehrenfest aan E.

Hardenberg, 13 juli 1931, E. Hardenberg aan Ehrenfest, 9 september 1933, APE ESC 5, sectie 4; diverse uitnodigingen, APE ESC 8, sectie 3 en sectie 4.

⁸⁸ Ehrenfest aan Lorentz, 25 mei 1927, APE ESC 7, sectie 8.

publiek.⁸⁹ Een aantal lezingen werd gepubliceerd, met medewerking van studenten van Ehrenfest.⁹⁰ Hoewel van zijn spectaculaire voordrachttechnieken op schrift weinig overbleef, is het betoog glashelder. Een aantal latere studenten raakte al onmiddellijk onder de indruk van hem door het bijwonen van lezingen bij Diligentia.

Het colloquium

Het colloquium was een andere door Ehrenfest ingestelde noviteit. Al in Sint Petersburg had hij een succesvol colloquium opgezet, dat sterk geïnspireerd was door zijn ervaringen met de colloquia van Felix Klein te Göttingen. Ten tijde van zijn aankomst te Leiden vonden colloquia en seminars maar zelden plaats.⁹¹ Wel hadden Kamerlingh Onnes en Lorentz in december 1882 een colloquium opgezet waarbij gevorderde studenten ten overstaan van hoogleraren en medestudenten over hun eigen onderzoek vertelden. Dat colloquium was breed van opzet.⁹² Het colloquium van Ehrenfest was door zijn regelmaat en intensiviteit echter van een heel andere orde. Zijn colloquium spitste zich bovendien expliciet toe op de actuele problemen binnen de theoretische natuurkunde, en ook jongerejaars studenten werden uitgenodigd deel te nemen.

Ehrenfest begon binnen enkele weken na zijn aankomst in Leiden al met het organiseren van het colloquium. Het vond aanvankelijk plaats bij hem thuis, maar werd later vanwege groeiende studentenaantallen verplaatst naar het natuurkundig laboratorium. Iedere woensdagavond, van half acht tot ongeveer tien uur, gaven studenten voordrachten over recent verschenen publicaties of eigen werk waar men mee bezig was. Daarna werd de discussie geopend. Ook de jongere studenten werden aangemoedigd om domme vragen te stellen en deel te nemen aan de discussies, iets dat buiten Ehrenfests colloquium niet overal gebruikelijk was. Zo informeerde Ehrenfest in 1927 voorzichtig bij de bezoekende

⁸⁹ Ehrenfest aan Lorentz, 25 mei 1927, APE ESC 7, sectie 8.

⁹⁰ Ehrenfest, *Golfmechanika* (1932); Ehrenfest, 'Micro- en macrophysica' (1926) 12-17.

⁹¹ Struik, *Autobiographical Notes* (1973), hfdst 5, 21.

⁹² Van Delft, *Heike Kamerlingh Onnes* (2005) 196-197; Lorentz aan Ehrenfest, 14 november 1912, APE ESC 7, sectie 4.

Planck of deze geen bezwaar had tegen de deelname van de jongeren.⁹³ Rutgers merkte bij een bezoek te Göttingen op dat het colloquium daar qua stijl verschilde van het colloquium van Ehrenfest. De voordrager getroostte zich minder moeite om het vertelde ook daadwerkelijk zelf helemaal te begrijpen, en op vragen waarop men het antwoord niet wist, werd ontwijkend gereageerd.⁹⁴ Ehrenfest hechtte aan informaliteit, want dat stimuleerde de productiviteit van de discussie: 'Die physikalischen Picknicks sind viel fruchtbarer als die physikalischen Predigten!'⁹⁵ Op internationale congressen en tijdens bezoeken aan buitenlandse collega's schuwde Ehrenfest het debat evenmin. Hij bombardeerde collega's met scherpe en ogenschijnlijk simpele vragen. Keer op keer kon Ehrenfest zo tot de kern van een ingewikkeld betoog komen, en problemen of paradoxen signaleren. Al snel werd Ehrenfest in Europa en Amerika gekenschetst als de 'menselijke katalysator', omdat hij helder denken stimuleerde bij iedereen met wie hij in contact kwam.⁹⁶

Ehrenfests geheel eigen wijze van het stellen van scherpe, soms striemende vragen was kenmerkend voor zijn discussiestijl. De vragen hadden zeker het gewenste effect om de discussie op scherp te stellen, en vandaar dat Ehrenfest door veel studenten en onderzoekers hooglijk werd gewaardeerd. Maar Ehrenfests vragenvuur tijdens colloquia en dispuutbijeenkomsten kon de sprekers ook nogal eens irriteren, vooral wanneer dat gepaard ging met scherp getoonzet commentaar. Soms lijkt het of Ehrenfest met zijn kritische bejegening zijn eigen onzekerheid probeert te verbergen. Volgens Casimir vormden Ehrenfests 'sarcastische opmerkingen een doorzichtige dekmantel ... voor zijn eigen kwetsbaarheid.'⁹⁷ Maar als het slachtoffer van zijn geestige opmerkingen en scherpe kritiek iemand was die hij graag mocht, kon hij op bijna 'kinderlijke en ontwapenende manier' zijn verontschuldigungen

⁹³ Ehrenfest aan M. Planck, 8 mei 1927, APE ESC 8, sectie 8.

⁹⁴ A.J. Rutgers aan Ehrenfest, 26 juli 1928, APE ESC 9, sectie 1.

⁹⁵ Ehrenfest aan F.W.G. Swann, 20 april 1929, APE ESC 9, sectie 7.

⁹⁶ I. Langmuir aan G.N. Lewis, 2 juli 1930, citaat in: Reingold en Reingold, *Science in America* (1981) 399.

⁹⁷ Casimir, *Het toeval van de werkelijkheid* (1983) 172-173; Toen Ehrenfests dochter Tanja lid werd van Christiaan Huygens, bleek dat ze dit trekje van haar vader had overgenomen. Net als haar vader had ze er een handje van om een enkel medelid te tentamineren 'met de opzettelijke bedoeling, hem in het zonnetje te zetten. Van wie heeft Tanja dat geleerd?', zie: Notulen Dispuut Christiaan Huygens, 30 november 1925.

aanbieden met een zinnetje als: ‘Je bent nu toch niet boos?’⁹⁸ In sommige gevallen kon Ehrenfest echter onredelijk agressief zijn, zoals we in het laatste hoofdstuk zullen zien.

Leidse fysici, zoals de naar Brussel vertrokken Nuyens, zetten elders colloquia op in de stijl van Ehrenfest.⁹⁹ Binnen enkele maanden startten deelnemers aan Ehrenfests colloquium een soortgelijk colloquium voor de Leidse wiskundigen en scheikundigen.¹⁰⁰ Pjotr Kapitza, die in Sint Petersburg de colloquia van Ehrenfest had gevolgd, zette in 1922 in Cambridge een informeel colloquium op, de beroemde en succesvolle ‘Kapitza Club’.¹⁰¹

De studenten moesten door Ehrenfest worden uitgenodigd voor het colloquium. Dat gebeurde wanneer hij merkte dat een student talent had. Maar evenzo belangrijk was de inzet die een student toonde. Ehrenfest verwachtte dat de genodigde studenten regelmatig het colloquium bijwoonden. Hij hield nauwgezet presentielijsten bij. Wanneer men ‘oscilleerde’, maakte hij de betreffende student duidelijk dat hij niet langer welkom was op het colloquium.¹⁰²

Voor een jonge fysicus kon het spreken op het colloquium nogal een beproeving zijn. Ehrenfest kon op ieder moment interrumpen met vragen of verbeteringen. Soms nam hij het zelfs geheel over. Buitenlandse bezoekers werden respectvoller behandeld, maar ook zij konden rekenen op een spervuur van vragen.¹⁰³ Omgekeerd liet Ehrenfest ook toe zelf op dergelijke wijze onder handen genomen te worden. Hij lijkt hierin te zijn geïnspireerd door Klein, die tijdens de geanimeerde seminaria iedere opmerking van studenten tolereerde en het toestond om ook zelf door een student te worden gecorrigeerd of aangevallen.¹⁰⁴

Na afloop vatte Ehrenfest de discussie en vaak de hele voordracht samen. Het verhaal gaat dat Einstein een keer op het colloquium een verhandeling hield over de relativiteitstheorie. Het werd Ehrenfest duidelijk dat de toehoorders het niet goed hadden begrepen, en dus vroeg

⁹⁸ Casimir, *Het toeval van de werkelijkheid* (1983) 96.

⁹⁹ Ehrenfest aan G.E. Uhlenbeck en S.A. Goudsmit, 11 april 1928, APE ESC 10, sectie 2.

¹⁰⁰ Klein, *Paul Ehrenfest* (1970) 9, 16.

¹⁰¹ M&R 4, 72-76.

¹⁰² Casimir, *Haphazard reality* (1983) 76.

¹⁰³ Casimir, *Haphazard reality* (1983) 76-77.

¹⁰⁴ Grattan-Guinness, ‘University mathematics at the turn of the century’ (1972) 381.

hij of hij het mocht proberen uit te leggen. Einstein had daar niets op tegen en nam plaats tussen de toehoorders. Na afloop van Ehrenfests betoog merkte Einstein op dat hij het nu eindelijk ook zelf had begrepen.¹⁰⁵ Waar of niet, deze anekdote omvat de kern van Ehrenfests wezen. Niet zelden begrepen de toehoorders, inclusief de spreker, pas na een samenvatting van Ehrenfest waar het werkelijk om ging.¹⁰⁶ Om deze reden wisten studenten dat als ze werkelijk wilden weten hoe de relativiteitstheorieën in elkaar zaten, ze niet bij Einstein moesten zijn, maar bij Ehrenfest.¹⁰⁷

Ook collega's kwamen om die reden bij Ehrenfest over de vloer. In 1914 namen twee Groningse hoogleraren, de astronoom J.C. Kapteyn en de filosoof G. Heymans, samen het boekje *Het relativiteitsprincipe* van Lorentz door. Daarna togen ze naar Leiden om niet Lorentz, maar Ehrenfest enige vragen te stellen over de theorie.¹⁰⁸ Max Born verhaalde van Ehrenfests bezoek aan het colloquium te Göttingen in de vroege jaren twintig. Na de voordragende student enige tijd te hebben aangehoord begon hij er korte opmerkingen en vragen tussendoor te gooien. Eerst kwamen de vragen van een op de eerste rij zittende Ehrenfest, maar al snel stond hij samen met de student aan het bord. Na de student te hebben verstrikt in een web van Socratische vragen en antwoorden begreep niemand meer wat van het probleem, totdat de correcte formulering van het probleem en haar oplossing langzaam uit de discussie tussen Ehrenfest en de student naar voren kwamen.¹⁰⁹

Ehrenfests aanwezigheid maakte het colloquium tot een spannende en dynamische aangelegenheid. Wanneer het colloquium bij zijn afwezigheid draaiende werd gehouden door de theoretisch begaafde, maar gortdroge hoogleraar experimentele natuurkunde Willem Keesom, waren de studenten daar niet al te blij mee: '[H]et colloquium onder leiding van Oom Kees is zeer vervelend.'¹¹⁰ Struik vond het niet verwonderlijk dat de meest getalenteerde studenten voor de natuurkunde en niet voor de wiskunde kozen. Hij herinnerde zich dat de wiskunde,

¹⁰⁵ Korthals Altes, 'Einstein en Ehrenfest' (2005) 159.

¹⁰⁶ Uhlenbeck, 'Reminiscences of Professor Paul Ehrenfest' (1956) 431-433, m.n. 432.

¹⁰⁷ Persoonlijke mededeling van A. Blaauw, 18 september 2008.

¹⁰⁸ Lorentz, *Het relativiteitsbeginsel* (1913); J.C. Kapteyn aan Ehrenfest, 16 mei 1914, APE ESC 6, sectie 5.

¹⁰⁹ Klein, 'Physics in the making in Leiden' (1989) 29-44, m.n. 37.

¹¹⁰ D. Coster aan H.A. Kramers, 2 februari 1924, AHQP 8, sectie 4.

voor de komst in 1916 van Van der Woude, nogal negentiende-eeuws was. In Leiden kregen studenten alleen door Ehrenfests colleges en colloquia een vleugje nieuwe wiskunde uit Göttingen te horen.¹¹¹

De onderwerpen op het colloquium bleven niet beperkt tot de theoretische fysica. Ook astronomische onderwerpen passeerden de revue. Ehrenfest was speciaal geïnteresseerd in het gebied waar de astronomie contact begon te maken met de nieuwe quantummechanica. Studenten met een sterrenkundige interesse werden door hem aangespoord zich in de nieuwste literatuur te verdiepen. Bart Bok, later een succesvol astronoom in de VS, kreeg als tweedejaarsstudent in 1926 de opdracht om binnen drie weken een colloquiumvoordracht voor te bereiden over Eddingtons zojuist verschenen *Internal constitution of the stars* – een moeilijk en baanbrekend boek waarin Eddington speculeerde dat sterren in hun binnenste een temperatuur van miljoenen graden Celsius bereikten door een speculatief soort van fusieproces tussen elektronen en protonen.¹¹² Dit bleek een hels karwei dat de tweedejaars student dwong tot de toppen van zijn kunnen te gaan.

Ehrenfest de pedagoog

In de periode van Ehrenfests Leidse professoraat worstelden Nederlandse geleerden met hun rol in een snel veranderende maatschappij. Dit is pakkend beschreven door de wetenschapshistoricus David Baneke. Wetenschappers ontpopten zich in de periode van 1900 tot 1940 in toenemende mate als deelnemers aan het maatschappelijk debat. Evenals andere intellectuelen en cultuurdragers leken zij in de ban van wat nu wel ‘the dilemmas of modernity’ worden genoemd. Cultuurcritici begonnen zich steeds krachtiger uit te spreken tegen de waargenomen schaduwzijden van de moderniteit. Die moderniteit werd gekarakteriseerd door maatschappelijke ontwikkelingen als industrialisatie, urbanisatie, en veranderingen in politieke cultuur. Deze werden gevreesd als mogelijk oncontroleerbare processen. Veronderstelde effecten waren technologisering, rationalisering, doelrationalisme, consumentisme, massacultuur, vervreemding en

¹¹¹ Struik, *Autobiographical Notes* (1973) hst. 5, blz. 9.

¹¹² NBL, AIP oral history interview transcript Bart Jan Bok, mei 1978, pagina 7, 8; Eddington, *The Internal Constitution of the Stars* (1926).

nervositeit, verpaupering en toenemende criminaliteit en prostitutie, verlies aan waarden en spiritualiteit.

De vraag rees of mensen de vele moderne veranderingen wel aankonden. Max Nordau merkte op dat de steeds groter wordende stad, met andere snelle veranderingen, aan de oorsprong lag van een toenemend aantal depressieven, zelfmoordenaars en alcoholici.¹¹³ Door technische innovaties veranderde de rol van arbeiders in het productieproces; ze werden slechts radertjes in een onpersoonlijk mechanisme. Arbeid werd gesystematiseerd, geordend en gestructureerd.¹¹⁴ Mensen raakten 'vervreemd' van de wereld om hen heen.¹¹⁵

Technologische en wetenschappelijke vernieuwingen volgden elkaar in rap tempo op. Het onderwijs leek niet meer opgewassen tegen de moderne problemen. Kinderen en studenten moesten leren met de snelle en steeds complexere ontwikkelingen in wetenschap en maatschappij om te gaan. Het bestaande middelbaar en hoger onderwijs werd daar niet meer geschikt voor geacht. De moderne tijd vroeg om modern onderwijs. Vraag was alleen hoe dat nieuwe onderwijs moest worden vormgegeven.

Ehrenfest had een uitgesproken visie op hoe onderwijs in al haar vormen eruit diende te zien. Zijn initiële interesse in het onderwijs vond zijn herkomst in zijn persoonlijke, negatieve ervaringen in het middelbare en hoger onderwijs. Hij was er van overtuigd – en velen met hem – dat het traditionele onderwijs drastische hervormingen moest ondergaan om aan de eisen van de moderne tijd tegemoet te komen. Willen we Ehrenfests toewijding tot het onderwijs begrijpen, dan dienen we kennis te nemen van de grote belangstelling voor onderwijsvernieuwing die alom leek te heersen.

Ehrenfest meende dat het geestelijk kapitaal het allerbelangrijkste bezit van een natie was.¹¹⁶ Volgens hem en vele anderen werd er binnen het bestaande onderwijs niet heel zuinig met dat kapitaal omgesprongen. Bij zijn aankomst in Nederland in 1912 rommelde het al langer binnen het Nederlandse onderwijs, en ook in andere Europese landen zoals Duitsland en Oostenrijk stond het

¹¹³ Nordau, *Entartung* (1892-1893 (2 delen)).

¹¹⁴ Baneke, *Synthetisch denken* (2008) 23-24; Van der Woud, *Een nieuwe wereld* (2006)

¹¹⁵ Baneke, *Synthetisch denken* (2008) 24; Kemperink, *Het verloren paradijs* (2001).

¹¹⁶ Ehrenfest aan Ph. Kohnstamm, 25 maart 1931, APE ESC 6, sectie 8.

onderwijs onder druk. De kritiek was dat het klassikale onderwijs niet langer in staat was de jeugd voor te bereiden op hun rol in de moderne samenleving. Bovendien werden een aantal kenmerken van het klassieke onderwijs zelf gezien als uitwassen van de moderniteit. Het waren onder andere de Utrechtse privatdocent pedagogiek Gunning en de Leidse hoogleraar geneeskunde Nolen die in een rapport in 1898 waarschuwden dat het onderwijs te eenzijdig intellectueel gericht was. Hierdoor ontstond er een risico voor geestelijke overbelasting van kinderen in de pre-puberteitsjaren. Daardoor was zelfs al een ‘steeds toenemend aantal jeugdige zenuwlijders’ te constateren. In de Duitstalige landen was een soortgelijk geluid te horen.¹¹⁷

Tegelijkertijd werd het duidelijk dat de generatie rond 1900 een heel andere vorming nodig had dan de generaties daarvoor.¹¹⁸ Internationaal was er een groeiende belangstelling voor pedagogiek ‘vom Kinde aus’. Centraal voor deze hervormingsbeweging was de afwijzing van uitsluitend cognitieve vaardigheden, en een belangstelling voor probleemgericht onderwijs op basis van de ervaring.¹¹⁹ Pedagogen, leerkrachten en artsen namen afstand van het leren van feiten in een ouderwetse luisterschool. Kinderen zouden zelf moeten leren problemen op te lossen. Zo werd aan de gezondheidskundige bezwaren tegemoet gekomen, en werd onderwijs aangepast aan het individuele kind. Door zelf problemen op te lossen leerde het kind zich bovendien beter staande houden in de moderne wereld die altijd in beweging was en waar zich voortdurend nieuwe problemen aandienden van technologische, sociale en politieke aard. Met andere woorden, met het nieuwe onderwijs werd een robuuste weerbaarheid voor de uitwassen van het moderne leven gekweekt.

De wens tot hervorming van het onderwijs lag aan de basis van de oprichting van de *Vereeniging Het Nederlandsch Lyceum* in 1908 door de politicus J. Limburg, onderwijsvernieuwer J. Ligthart, pedagoog J.H. Gunning Wzn., politicus en natuurkundige D. Bos, ingenieur en politicus

¹¹⁷ Mulder, ‘Puberteit, pedagogiek en een proefschoon voor heel Nederland’ (1985) 169-181; Citaat op 173. Het betreft hier een typisch moderniteitsverschijnsel. Ook andere Nederlandse academici waarschuwden voor overspanning en te veel boekenkennis. Zie: Baneke, *Synthetisch denken* (2008) 62-63. In de Duitstalige landen trokken academici een zelfde conclusie als Gunning en Nolen. Zie hiervoor: Wegener, *A True Proteus* (2009) 169-172.

¹¹⁸ Zie bijvoorbeeld een beschrijving hiervan in de autobiografie: Adams, *The education of Henry Adams* (1931) 26.

¹¹⁹ Van Hilvoorde, *Grenswachters van de pedagogiek* (2002) 27-29.

C. Lely en de natuurkundige Lorentz. De oprichters wilden de problemen van het 'oude' onderwijs ondervangen door pas na een brede basis van twee jaar een natuurwetenschappelijke of klassieke richting aan te bieden. Volgens hen werd met het Lyceum het gevaar van de intellectuele overladenheid omzeild. Bovendien werd op het Lyceum een richting opgezet waarin de 'moderne cultuur' centraal stond, en waarin klassieke talen en wiskunde op de achtergrond bleven. Dit werd nota bene door Lorentz bepleit. Volgens de oprichters was het Lyceum niet zomaar een combinatie tussen HBS en Gymnasium. De rector, de pedagoog R. Casimir, noemde het een holistisch schooltype: het was meer dan de som der delen, het was een 'intrinsieke eenheid'. Op het Lyceum lag de nadruk op zelfwerkzaamheid en ervaring, die de basis zouden vormen voor het vinden van de eenheid achter de gespletenheid van 'het gebroken leven'.¹²⁰

De problematiek van de moderniteit werd door de Eerste Wereldoorlog extra zichtbaar gemaakt. De bezorgdheid over de gevolgen van de modernisering zorgde in het interbellum voor een verdere verandering in de houding van politici en wetenschappers ten opzichte van de jeugd. Volgens een in 1919 uitgekomen onderzoeksrapport hadden industrialisatie en urbanisatie al ernstige schade aangericht aan de moraal van de jeugd, maar werd de schade nog eens verergerd door de oorlog. Het karakter van kinderen moest worden versterkt ten behoeve van de toekomstige samenleving. Het moest worden aangepast aan de eisen van de moderne tijd.¹²¹ In 1918, na de beëindiging van de schoolstrijd, werd in Nederland voor het eerst een Minister van Onderwijs aangesteld. Die riep in 1919 als adviesorgaan de Onderwijsraad in het leven, met als leden onder anderen de pedagoog Philipp Kohnstamm en Lorentz.¹²²

De overheid droeg in eerste instantie weinig bij aan de ontwikkeling van moderne opvoeding en onderwijs. Er waren echter genoeg maatschappelijk initiatieven om dit te compenseren. Zo werden de eerste hoogleraren in de pedagogiek in het interbellum door particuliere instellingen gefinancierd. Philipp Kohnstamm, hoogleraar thermodynamica en opvolger van Van der Waals in Amsterdam, achtte de pedagogiek van zo'n vitaal belang voor de samenleving, dat hij zijn

¹²⁰ Casimir, *Het Nederlandsch Lyceum* (1934) 9-60, 163-167; Casimir, *De plaats van het Lyceum* (1932) 10-16.

¹²¹ De Rooy, *Republiek van rivaliteiten* (2002) 172-174.

¹²² Drop, *De Onderwijsraad gehoord* (1964) 202-214.

werkterrein in 1919 verlegde naar de pedagogiek.¹²³ In 1919 maakte de *Maatschappij tot Nut van 't Algemeen* het hem mogelijk om als tweede hoogleraar pedagogiek in Nederland te worden aangesteld, en wel aan de universiteit van Amsterdam. Een jaar eerder was R. Casimir namens het *Nederlandsch Lyceum* te Leiden aangesteld. Aan de andere universiteiten werden professoraten ingesteld in 1923 (J.H. Gunning Wzn. te Utrecht en J.H.E.J. Hoogveld te Nijmegen) en in 1926 (J. Waterink aan de VU).¹²⁴

In het interbellum maakten nieuwe schooltypes, die meestal rond de eeuwwisseling waren ontwikkeld, een bloeitijd door in Nederland. Uit private gelden werden veel Montessori- en Dalton scholen gesticht.¹²⁵ In 1917 werd *De Nederlandse Montessorivereniging* opgericht. Na oprichting van de *Daltonvereniging* in 1931 schoten tientallen Dalton scholen als paddenstoelen uit de grond. Nederland had een wereldwijde primeur met de introductie van de methodes van Montessori en Parkhurst in het middelbaar onderwijs.¹²⁶ In 1923 werd de eerste, op de antroposofie gebaseerde, Vrije School opgericht.¹²⁷

De nieuwe schooltypes vielen in vruchtbare bodem. Grootste gemene deler was het begrip *zelfwerkzaamheid*. Ook aan het Nederlandsch Lyceum werd dit begrip belangrijk gevonden. De fysicus Reindersma ontwikkelde er een eigen, op experiment en ervaring gebaseerde methode van natuurkundeonderwijs. Daarbij gingen zelfwerkzaamheid en inzicht in de natuurwetenschappelijke methode vóór het stampen van feiten.¹²⁸ Door zelfwerkzaamheid en ervaring zouden kinderen leren een eenheid te ontdekken in de waarnemingen. Met andere woorden, kinderen moesten worden geoefend in 'synthetisch denken'. Die aanpak was niet alleen geschikt om de steeds complexere, moderne wetenschappelijke problemen te leren oplossen, maar ook de

¹²³ Voor Kohnstamm, zie: Hollestelle, *Beperkte spontaniteit* (2004); Mulder, *Beginsel en beroep* (1989); Klomp, *De relativiteitstheorie in Nederland* (1997) 119-152.

¹²⁴ Mulder, *Beginsel en beroep* (1989). Ook in België lag het zwaartepunt van de academisering van de pedagogiek in het interbellum. Zie: De Vroede, 'Onderwijs en pedagogiek' (1987) 115-140, m.n. 126-127.

¹²⁵ Baneke, 'Synthese' (2005) 173.

¹²⁶ Ik gebruik de term 'middelbaar onderwijs' in zijn moderne betekenis, en deze omvat dus HBS, Lyceum en Gymnasium (hoewel Gymnasium in feite tot het hoger onderwijs werd gerekend).

¹²⁷ Baneke, 'Synthese' (2005) 169-185.

¹²⁸ Casimir, *Het Nederlandsch Lyceum* (1934) 213-219.

gecompliceerde maatschappelijke. Bovendien, zo meende onder anderen de bioloog H.J. Jordan, gaf synthetisch denken een soort robuustheid tegen demagogie, fascisme en dictatuur, die alle een beroep deden op het menselijk instinct.¹²⁹ Het Montessori-onderwijs legde in zijn ogen een basis voor dit synthetisch denken. Samen met de fysicus L.S. Ornstein was Jordan actief in het hoofdbestuur van de stichting voor Middelbaar en Voorbereidend Hooger Montessori-onderwijs.¹³⁰

Hevige discussies werden gevoerd over vorm en inhoud van de vakken die zouden moeten worden aangeboden op het middelbaar onderwijs – zoals thuis bij Paul en Tatyana Ehrenfest.¹³¹ Toen Ehrenfests echtgenote nog in Nederland verbleef, gaf ze een maandelijks colloquium over wiskundendidactiek, waar ideeën van Felix Klein, Ligthart, R. Casimir en haarzelf werden besproken in aanwezigheid van Ehrenfests studenten Minnaert, Struik en enkele middelbareschooldocenten.¹³² Felix Klein ontwikkelde aan het begin van de twintigste eeuw nieuwe denkbeelden over de wiskundendidactiek en was voorzitter van een internationale onderwijscommissie die de vernieuwingen vorm moest gaan geven.¹³³ In de jaren die volgden zou het huis van de Ehrenfests een centrum van didactische vernieuwing worden; vooral Tatyana Ehrenfest drukte haar stempel op de felle discussies die tussen wetenschappers werden gevoerd over onder andere het wiskundeonderwijs.

Onderwerp van debat waren onder meer de onderwijsmethodes in de wiskunde, mechanica en natuurkunde. Onder de actiefste deelnemers bevonden zich de filosoof Heymans, Kohnstamm, Fokker, de wiskundige Mannoury, de astronoom Minnaert en Paul en Tatyana Ehrenfest. De wetenschapshistoricus en HBS-leraar Dijksterhuis

¹²⁹ Baneke, 'Synthese' (2005) 169-185. Dergelijke opvattingen zien we ook bij Kohnstamm en Ehrenfest. Zie: Hollestelle, 'Zuivere praktijk' (2007) 53-65, m.n. 63-65.

¹³⁰ Niet alleen in Nederland waren natuurwetenschappers om deze reden actief bezig met pedagogiek en het onderwijs. De bekende natuurkundige Paul Langevin werd in 1922 president van de Franse vereniging voor pedagogiek en zou na de Tweede Wereldoorlog zijn stempel drukken op het Franse onderwijs. Zie: Bok en Kounelis, 'Paul Langevin' (2007) 19-21.

¹³¹ Zie voor de vele discussies over pedagogiek en de invulling van het natuurwetenschappelijk en wiskundig onderwijs in het interbellum: Klomp, *De relativiteitstheorie in Nederland* (1997) 153-225.

¹³² Struik, *Autobiographical Notes* (1973), hfdst 5, 23-24.

¹³³ Klomp, *De relativiteitstheorie in Nederland* (1997) 231n.

verdedigde de traditionele axiomatische aanpak. Hij werd al gauw door onder andere Kohnstamm, Fokker en de Ehrenfests als ouderwets bestempeld. Fokker pleitte voor nieuw natuurkundeonderwijs op basis van de empirie, waarbij de leerling zelf zijn conclusies moest trekken. In zijn ogen gaf dit natuurkundeonderwijs een grondslag voor wereldbeschouwing en had het een breed vormende waarde.¹³⁴ Tatyana Ehrenfest verdedigde een aanschouwelijke manier van wiskundeonderricht, en sloot hierbij aan op de denkbeelden van Ehrenfest: wiskunde en natuurkunde dienden in eerste instantie aanschouwelijk en intuïtief te zijn.¹³⁵

Natuurwetenschappers pleitten tevens voor onderwijs in de geschiedenis van hun vakgebied als onderdeel van deze brede vorming. Bovendien zou wetenschapsgeschiedenis het inzicht in de natuurwetenschappen kunnen vergroten.¹³⁶ Zo stelde Ehrenfest tijdens een colloquium in de VS eens aan de orde op welke wijze Maxwell vond dat elektromagnetische verstoringen zich met de lichtsnelheid voortplanten. Dat sloot nauw aan bij zijn voorliefde voor de grondslagen van het vak.¹³⁷ Ook Dijksterhuis, en de chemici F.M. Jaeger en E. Cohen bepleitten het belang van wetenschapsgeschiedenis voor de algemene vorming voor natuurwetenschappers,¹³⁸ een pleidooi dat ook tegenwoordig nog weerklank vindt.¹³⁹

Natuurwetenschappers bemoeiden zich niet alleen actief met de hervorming van het onderwijs op lagere en middelbare scholen, maar ook met de oprichting van de eerste pedagogische leerstoelen aan de Nederlandse universiteiten. Als lid van het curatorium van het Lyceum werkte Lorentz mee aan een aanvraag van een extraordinariaat voor Casimir aan de Leidse universiteit. Hoewel de senaat van de universiteit dit aanvankelijk afwees en later slechts met tegenzin een bijzondere leerstoel accepteerde, weerhield dat Lorentz er niet van om de senaat te

¹³⁴ Fokker, 'Losse aantekeningen over ons natuurkunde-onderwijs' (1926-1927) 961-963; Fokker, 'Over te betwijfelen evidenties' (1936) 11-23. Zie ook: Klomp, *De relativiteitstheorie in Nederland* (1997) 184-198.

¹³⁵ Over de educatieve vernieuwingsdrang en het stempel dat Tatyana Ehrenfest op het wiskunde-onderwijs wist te drukken, zie: Klomp, *De relativiteitstheorie in Nederland* (1997) 164-179.

¹³⁶ Ehrenfest aan Ph. Idenburg, 25 september 1930, APE EPC 1, sectie 9.

¹³⁷ Ehrenfest aan Ph. Idenburg, 1 juli 1930, APE EPC 1, sectie 8.

¹³⁸ Baneke, *Synthetisch denken* (2008) 165.

¹³⁹ Van Lunteren, *De glimlach van de Cheshire kat* (2009); Theunissen, *De januskop van de wetenschapsgeschiedenis* (2006).

trotseren door in 1918 zitting te nemen in het curatorium van de leerstoel. Ehrenfest nam een jaar later zitting in het college van curatoren van Kohnstamms bijzondere leerstoel in de pedagogiek te Amsterdam. Ehrenfest was zowel met Kohnstamm als met Casimir bevriend, en hij kwam veelvuldig bij hen over de vloer. Casimir prees Ehrenfest niet alleen om zijn onderricht, maar vooral voor de opvoedkundige werking die hij op zijn pupillen had.¹⁴⁰ Ook met de pedagoge Cornelia Philippi – in 1918 leidster van de eerste opleiding voor Montessori-leerkrachten in Nederland – had Ehrenfest een goed contact.¹⁴¹ Hij had een warme belangstelling voor experimentele onderwijsmethoden. Hij bezocht graag nieuwe scholen waar alternatieve onderwijsvormen werden aangeboden. Kennelijk konden de onderwijsexperimenten de hervormers ook te ver gaan. Philippi bracht hem onder andere op de hoogte van een school te Cambridge waar kinderen van vijf tot tien jaar volledig zonder leiding met allerlei speelmiddelen en instrumenten in contact werden gebracht; het resultaat was volgens Philippi een verwaarloosde kolonie mensapen.¹⁴²

Ehrenfest had een diepgeworteld wantrouwen ten opzichte van het reguliere onderwijs – ‘confectiepakjes voor de geest’¹⁴³ – en dat bracht hem ertoe zijn kinderen thuis te laten onderwijzen.¹⁴⁴ Ook Leidse studenten werden ingezet voor het onderwijs aan de kinderen Ehrenfest. Rutgers instrueerde als huisleraar Paul jr. onder andere in de scheikunde.¹⁴⁵ Ook stuurde Ehrenfest zijn kinderen voor verdere vorming naar vrienden in binnen- en buitenland, zoals naar Kohnstamm te Ermelo en Attwell in Engeland. Van mevrouw Attwell kreeg hij het

¹⁴⁰ R. Casimir aan Ehrenfest, APE EPC 1, sectie 5.

¹⁴¹ Voor Philippi, zie: Singer, ‘C. Philippi-Siewertsz van Reesema’ (1991) 106-116.

¹⁴² Ehrenfest aan vrouw en kinderen, 3 januari 1929, APE EPC 1, sectie 7.

¹⁴³ Casimir, ‘Bij Prof. Ehrenfests overlijden’ (1949) 432-433, m.n. 433.

¹⁴⁴ Klein, *Paul Ehrenfest* (1970) 308-309. Citaat in: Casimir, ‘Bij Prof. Ehrenfests overlijden’ (1949) 432-433, m.n. 433. Desondanks stelde Ehrenfest zich in 1933 beschikbaar als gecommiteerde voor de eindexamens Gymnasium, iets dat hij zeer serieus nam. Hoewel dergelijke examens hem tegenstonden maakte zijn ervaringen nu dat hij toch zeer enthousiast was over het enthousiasme dat hij zag onder de leerkrachten; zie hiervoor: Casimir, ‘Bij Prof. Ehrenfests overlijden’ (1949) 432-433, m.n. 433; Zie hierover ook: Ehrenfest aan J. van Andel, 16 maart 1933, APE EPC 1, sectie 3; Ehrenfest aan A.F. Joffe, 9 juli 1933, APE ESC 6, sectie 3; Ehrenfest aan J. van Andel, 14 maart 1933, J. van Andel aan Ehrenfest, 14 maart 1933, APE ESC 8, sectie 4.

¹⁴⁵ A.J. Rutgers aan Ehrenfest, 25 november 1929, ESC 9, sectie 2.

advies Paul jr. ook naar een gewone school te sturen om zijn karakter te vormen en te leren omgaan met andere jongens. De jonge, intellectueel vroegrijpe Paul jr. – die thuis in aanraking kwam met de intellectuele wereldtop – kon prima opschieten met volwassenen, maar wist zich in het geheel geen houding te geven ten opzichte van leeftijdgenoten.¹⁴⁶

De motivatie die Ehrenfest gaf voor zijn aversie tegen het gangbare schoolsysteem komt sterk overeen met de ideeën van tijdgenoten als Kohnstamm en Herman Jordan; het onderwijs was eenzijdig gericht op feitenkennis en legde zodoende niet de noodzakelijke basis om de ingewikkelde moderne ontwikkelingen en problemen de baas te kunnen. Zoals Ehrenfest het verwoordde:

‘Mit wieviel dummen Zeug werden doch unsere Köpfe in der Schule vollgepropft. Und es wäre doch unter richtiger Leitung wahrscheinlich ganz leicht die grossen Kräfte in der Welt in ihren relatieven Grössen ROH überblicken zu lernen.’¹⁴⁷

Bovendien kon de waarde van een opleiding volgens Ehrenfest niet worden afgemeten aan het wel of niet verkrijgen van een diploma. Een diploma dwong mensen per definitie om zich te conformeren aan een van tevoren vastgesteld onderwijsprogramma. Dat sloot de persoonlijke ontwikkeling uit die juist zo belangrijk was voor het creatief en ondogmatisch leren denken. En dat laatste was weer belangrijk voor het kunnen oplossen van de gecompliceerde wetenschappelijke en maatschappelijke problemen. Met zijn typerende gevoel voor metaforen schreef hij:

‘Und diese verdammten Papiere und Diplome sind so teuflisch gefährlich, weil sie Leute, die ihrer SPEZIFISCHEN Beitrag zur Weltarbeit leisten sollen weil sie die in die gefährliche Situation bringen, die der Radfahrer erlebt, wenn er in eine Tramschiene oder in eine tiefausgefahrene Wagenspur auf der Landstrasse gerät.’¹⁴⁸

¹⁴⁶ Ehrenfest aan Ph. Kohnstamm, 12 april 1928, APE ESC 6, sectie 7; Ehrenfest aan M. & A. Attwell, 13 maart 1930; Ehrenfest aan M. & A. Attwell, 27 april 1930; Alice Attwell aan Ehrenfest, 11 mei 1930, APE EPC 1, sectie 3.

¹⁴⁷ Ehrenfest aan Ph. Idenburg, 2 augustus 1930, APE EPC 1, sectie 8.

¹⁴⁸ Ehrenfest aan vrouw en kinderen, 16 november 1928, APE EPC 1, sectie 6.

Deel 2. Leerlingen

*Jeder von Euch ist mir während einer
Strecke Eures Lebens so etwas, wie mein
eigenes Kind gewesen.*

Paul Ehrenfest in zijn afscheidsbrief aan zijn leerlingen.¹⁴⁹

*Met hem is een der mannen weggegaan die
mij het diepste beïnvloed hebben. Wat er van
mij tot dusver terechtgekomen is, en wat
levensbeschouwing ik verkregen heb is voor
een belangrijk gedeelte onder zijn invloed
ontstaan. Ik geloof dat dit voor alle
"jongeren" geldt, die uit Leiden's wis- en
natuurkundige school te voorschijn zijn
gekomen... .*

Dirk Struik aan Tatyana Ehrenfest.¹⁵⁰

Leerlingen

Ik heb laten zien dat bijvakstudenten door Ehrenfest zonder veel problemen door hun 'Kwattatentamen' werden geloodst. Studenten die verder wilden in de theoretische fysica waren geheel aan Ehrenfests goede wil overgeleverd. Hij accepteerde maar een beperkt aantal studenten. Voorwaarde was dat een student getalenteerd moest zijn. Daarnaast moest hij inzet tonen: wegblijven bij het colloquium of het missen van een van Lorentz' maandagmorgencolleges diskwalificeerde een student in Ehrenfests ogen. Minstens zo belangrijk was dat hij met de betrokken student overweg kon. De student werd ingevoerd in de frontgebieden van de theoretische fysica door middel van dagelijkse

¹⁴⁹ Paul Ehrenfest aan zijn leerlingen, 15 augustus 1932, Museum Boerhaave, archief 543.

¹⁵⁰ D.J. Struik aan T. Ehrenfest, 14 oktober 1933, APE ESC 9, sectie 7.

samenwerking. Ehrenfest meende dat dit intensieve contact onmogelijk was wanneer iemand hem persoonlijk niet lag of wanneer iemands denkstijl afweek van de zijne. Wanneer dat het geval was, kon hij een student op brute manier de deur wijzen. Hij was zich bewust dat hij met zijn persoonlijke aanpak een specifiek slag fysici kweekte. Hij pleitte voor de aanstelling van Fokker als bijzonder hoogleraar, om ook andere, meer mathematisch opererende fysici ruimte te bieden. Ehrenfest erkende dat zijn eigen aversie het onmogelijk maakte om dit soort studenten vast te houden voor de Leidse theoretische fysica. Hij doorzag zijn eigen tekortkomingen als docent, maar dat maakte zijn geprikkelde reacties op studenten waar hij het niet mee kon vinden niet milder.

Ehrenfest werkte steeds zeer intensief met één student samen. Ook werden discussies in groepjes georganiseerd.¹⁵¹ Hij stelde getalenteerde studenten in de regel aan als zijn assistent. Ook studenten uit het buitenland, zoals Krutkow en Epstein, werden assistent.¹⁵² Hij had tevens een grote invloed op bezoekende studenten. Een jonge, onzekere Fermi kreeg door een bezoek aan de energieke en geïnteresseerde Ehrenfest het nodige zelfvertrouwen.¹⁵³ Victor Weisskopf merkte op dat Ehrenfest een grotere invloed op hem had dan zijn docenten te Göttingen. Ehrenfest leerde hem de gecompliceerde wiskunde uit Göttingen te wantrouwen, en door 'stomme vragen' te durven stellen door te stoten naar de echte fysica.¹⁵⁴ Student Jan Burgers vatte Ehrenfests invloed als volgt samen:

'Ehrenfest made us acquainted with all [new developments in physics], and let us also share in the development of his own thinking. He often needed one or other of his students to talk about some new ideas, as he found this helpful to clear up his mind. ... Ehrenfest taught us how to read scientific papers, to look for the assumptions made by the authors, and to hunt them out when they were not given explicitly.'¹⁵⁵

¹⁵¹ Uhlenbeck, 'Reminiscences of Professor Paul Ehrenfest' (1956) 431-433, m.n. 432; Ehrenfest aan M. Born, 21 januari 1928, APE ESC 1, sectie 10.

¹⁵² Lorentz aan Ehrenfest, 18 juli 1919, APE ESC 7, sectie 7; Ehrenfest aan Lorentz, Lorentzarchief, toegangsnummer 364, inv. nr. 20.

¹⁵³ Segrè, *Enrico Fermi* (1970) 34, 36.

¹⁵⁴ Weisskopf, *Physics in the Twentieth Century* (1972) 2-3.

¹⁵⁵ J.M. Burgers, geciteerd in: Alkemade, 'Biography' (1995) xi-cix, m.n. xiv.

Iedere middag werd samengewerkt aan een probleem dat Ehrenfests interesse had, of werd een recent uitgekomen artikel besproken waarover hij vragen had. De discussie verliep snel, en er werd op het bord gewerkt. Wanneer het bord vol was werden de hoofdpunten opgeschreven in een notitieboekje. De student werd door Ehrenfests vragen gedwongen om het bestudeerde tot in detail te volgen. Ehrenfest wilde zeker weten of een student het daadwerkelijk had begrepen. De grootste fout die men kon maken was getuigen dat men het had begrepen, terwijl dat niet het geval was; Ehrenfest kwam hier altijd achter door zijn socratisch vragenvuur. Dat dwong de studenten in het begin om op hun tenen te lopen. Uhlenbeck beschrijft de dodelijke vermoeidheid die hij had als hij een middag lang met Ehrenfest had samengewerkt. Na enige tijd hadden de studenten zoveel geleerd, dat ze op gelijkwaardige basis samenwerkten met Ehrenfest.¹⁵⁶ Ehrenfest was zelf op dezelfde manier door Boltzmann behandeld, en het is bekend dat Uhlenbeck later op dezelfde manier met zijn studenten omging.¹⁵⁷

Wanneer Ehrenfest het gevoel kreeg dat hij een student niets meer kon leren, zond hij hem naar één van de andere leidende centra voor theoretische fysica in Europa. Bij de keuze van de juiste plek was het belangrijk dat hij deze bij de persoonlijkheid en het ontwikkelingsniveau van de student vond passen. Veel van zijn studenten deden op een of ander ogenblik in hun opleiding Bohrs instituut te Kopenhagen aan, in die tijd hét belangrijkste centrum voor de theoretische fysica. Tijdens zijn studie bij Boltzmann had Ehrenfest de voordelen van een verblijf elders leren kennen. In een heel nieuw klimaat te Göttingen – los van de veeleisende Boltzmann – kwam Ehrenfests ontwikkeling tot zelfstandig wetenschapper pas goed op gang.¹⁵⁸

Ehrenfest vatte het geheim van zijn methode als volgt samen: ‘Weshalb habe ich solche gute Studenten? Weil ich so dumm bin!’¹⁵⁹ Hij kon nauwelijks dom worden genoemd, maar de uitspraak is in deze zin waar: zijn zelftwijfel versterkte de kwaliteiten van zijn studenten, zoals we zullen zien.

¹⁵⁶ Uhlenbeck, ‘Reminiscences of Professor Paul Ehrenfest’ (1956) 431-433, m.n. 432.

¹⁵⁷ Pais, *The genius of science* (2000) 316.

¹⁵⁸ Klein, *Paul Ehrenfest* (1970) 42-43.

¹⁵⁹ Ehrenfest, geciteerd in: Uhlenbeck, ‘Reminiscences of Professor Paul Ehrenfest’ (1956) 431-433, m.n. 433.

Ehrenfest zette zich in om de carrière van zijn leerlingen op gang te helpen. Een academische loopbaan kon gestimuleerd worden door het winnen van diverse prijsvragen die door stichtingen of de faculteit werden uitgeschreven. Ook Teylers Tweede Genootschap, waarvan Lorentz lid was, schreef prijsvragen uit. Volgens Lorentz kon men over het nut van de prijsvragen verschillend oordelen, en kon men de prijsvragen net zo goed naar een bepaalde student toeschrijven. Ehrenfest stimuleerde Burgers bijvoorbeeld om een speciaal voor hem uitgeschreven prijsvraag van Teylers Tweede Genootschap te beantwoorden.¹⁶⁰ Voor Tinbergen (die door Ehrenfest werd aangemoedigd zijn carrière binnen de economie voort te zetten, zie hoofdstuk 6) vroeg Ehrenfest het *Legatum Stolpianum* – Ehrenfest was lid van het curatorium van deze oude wetenschappelijke prijs – een prijsvraag op het gebied van de economie uit te schrijven. Dit gebeurde, en Tinbergen kreeg een gedeelde eerste prijs.¹⁶¹ Ook zette hij de faculteit in 1929 aan tot het uitschrijven van een prijsvraag waarin gevraagd werd naar ‘een kritisch overzicht omtrent nieuwere theoretische opvattingen over de elektriciteitsgeleiding in metalen’. Deze vraag bleef echter helaas onbeantwoord.¹⁶²

Ehrenfest meende dat studenten zowel theoretische als praktische vaardigheden moesten ontwikkelen. Een belangrijke motivatie hiervoor was om betere kansen op werk aan een universiteit of in de industrie te verkrijgen. Theoretische fysica was immers nog steeds een klein vakgebied, en juist in het interbellum nam het industrieel onderzoek een hoge vlucht. Daarnaast vond hij het de taak van een theoreticus om ook voeling te houden met het experimenteel wetenschappelijk werk.

Het verwerven van zowel theoretische als meer praktische vaardigheden kon volgens Ehrenfest niet tegelijkertijd; men moest zich eerst concentreren op het leren van het één, dan het ander, en wellicht enige malen tussen theorie en praktijk op en neer bewegen. Industrieel werk met vrije diepgaande studie combineren mislukte vrijwel altijd. Hij noemde Uhlenbecks onderbreking als huisleraar bij de Nederlandse gezant te Rome als een geslaagd voorbeeld.¹⁶³

¹⁶⁰ Lorentz aan Ehrenfest, 6 mei 1918, APE ESC 7, sectie 7.

¹⁶¹ Jolink, *Jan Tinbergen* (2003) 48–49.

¹⁶² Van Lieburg, *De academische prijsvragen* (2007) 120; Ehrenfest aan Van der Woude, 4 april 1929, APE ESC 10, sectie 8.

¹⁶³ Ehrenfest aan vrouw en kinderen, 8 november 1928, EPC 1, sectie 6.

Wanneer leerlingen zich in een later stadium wilden bewijzen als experimentator, konden ze in sommige gevallen bij Lorentz terecht. Als Curator van het Laboratorium van Teylers Stichting was Lorentz in de gelegenheid om ook experimenteel werk te doen. Hij kwam er echter vanwege zijn vele andere verplichtingen maar mondjesmaat aan toe, hoewel het één van de redenen was waarom hij naar Teylers Stichting was gegaan. Fysici als W.J. de Haas, J.M. Burgers, B. van der Pol, D. Coster en A.D. Fokker – los van De Haas, die een pure experimentator was, allen begaafde theoretici – bekleedden er de positie van conservator: een soort assistentfunctie, bedoeld voor jonge fysici. Voor hen was dit een opstap in hun carrière, al leidde het onderzoek dat gedaan werd niet altijd tot resultaten. Coster zette er zijn in Zweden begonnen röntgendiffractie-experimenten voort. In 1924 begon hij als eerste aan een Nederlandse universiteit te werken aan röntgendiffractie; als pas benoemd hoogleraar experimentele fysica te Groningen deed hij zijn eerste metingen met apparatuur die hij te leen had van Teylers Stichting.¹⁶⁴ Ehrenfest zond soms ook studenten naar Ornstein, zoals we in hoofdstuk 5 zullen zien.

Ehrenfest stuurde zijn studenten ook naar het buitenland om ervaring met experimenteel werk op te doen, of in ieder geval om dit werk van nabij mee te maken. Zo werd Casimir naar het laboratorium van Lise Meitner te Berlijn gestuurd, als theoretische hulp voor de daar uitgevoerde experimenten in de atoomfysica.¹⁶⁵

Ehrenfest begeleidde in vijftien jaar tijd tien promovendi. Tussen 1918 en 1922 promoveerden Burgers, Kramers, Tresling¹⁶⁶ en Coster, en tussen 1927-1931 Uhlenbeck, Goudsmit, Tinbergen, Rutgers, Casimir en Krans. De kwaliteit van Ehrenfest als opleider is terug te zien wanneer we zijn studenten aan een nadere beschouwing onderwerpen. De promovendi worden hierna één voor één nader bekeken, waarbij hun relatie met Ehrenfest en hun latere carrière zal worden toegelicht.

Jan Burgers was Ehrenfests eerste promovendus. Hij begon in 1914 met zijn studie en werkte van 1916 tot 1917 als assistent op het lab van Kamerlingh Onnes. Burgers verruilde maar al te graag het geestdodende werk van het enkel aflezen van galvanometers in het dictatoriaal gerunde lab van Kamerlingh Onnes voor de meer

¹⁶⁴ Van Hoorn, 'The Physics Laboratory of the Teyler Foundation' (1998) 14-21.

¹⁶⁵ H.B.G. Casimir aan Ehrenfest, 13 juni 1932, APE ESC 2, sectie 9.

¹⁶⁶ Van Jan Tresling zijn geen biografische gegevens gevonden.

opwindende theoretische fysica onder de informele Ehrenfest.¹⁶⁷ Hij werd opgenomen in de kring van Ehrenfest en raakte volledig in de ban van zijn leermeester. Na iets meer dan drie jaar studie deed Burgers al doctoraalexamen. Vervolgens werd hij in 1918 te Haarlem aangesteld als conservator van het Natuurkundig Laboratorium van Teylers Stichting. Formeel was dit een experimentele aanstelling, maar het is heel goed mogelijk dat Ehrenfest dit tevens zag als een kans om Burgers van een bescheiden salaris te voorzien als theoretisch assistent van Lorentz. In Haarlem voltooide Burgers zijn dissertatie, een uitwerking van eerder werk op het gebied van Ehrenfests adiabatiese hypothese. Hij had dit werk in 1918 ook opgestuurd als beantwoording van een prijsvraag van Teylers Tweede Genootschap; Burgers won de eerste prijs en een gouden medaille. Nog voor zijn promotie in november 1918 kreeg hij uit Delft het aanbod om hoogleraar aero- en hydrodynamica te worden. Dit bleef hij tot na de oorlog. In 1955 zou hij vertrekken naar de University of Maryland in de Verenigde Staten.¹⁶⁸ Toen hij eenmaal in Delft zat, zochten Coster en Ehrenfest naar mogelijkheden om hem daarvan los te weken en hem weer in het theoretisch fysisch onderzoek te krijgen. Coster en Ehrenfest zagen zich met de problemen in de quantummechanica graag geholpen door de begaafde Burgers, die zelfs door Kramers werd beschouwd als de meest getalenteerde student van Ehrenfest.¹⁶⁹

Zoals veel van Ehrenfests leerlingen bezat ook Burgers een sterk maatschappelijk engagement. Hij werd in zijn studententijd lid van de Communistische Partij Holland. Ehrenfest maakte Burgers later enthousiast voor wetenschappelijk ‘zendingelingenwerk’ naar Rusland. Burgers zou zelf meerdere malen naar Rusland reizen, verdiepte zich in de Russische taal en kreeg er zelfs een positie aangeboden – die hij overigens vanwege ziekte van zijn vrouw niet kon aannemen.

De relatie tussen Burgers en Ehrenfest is een goed voorbeeld van Ehrenfests persoonlijke bemoeienissen met zijn studenten. Hij kwam veel bij Burgers thuis en sprak vele plezierige uren met Burgers’ vader over allerlei zaken. Ook gaf hij zijn moeder tips zodat Burgers goed bleef

¹⁶⁷ Van Delft, *Heike Kamerlingh Onnes* (2005) 324-325.

¹⁶⁸ Alkemade, ‘Biography’ (1995) xi-cix; *Wie is dat?* (1956) 104.

¹⁶⁹ Ehrenfest aan J.M. Burgers, 11 juli 1926, BA; Struik, *Autobiographical Notes* (1973), hfdst 5, 18-19.

werken zonder aan de inspanningen van het werk te bezwijken.¹⁷⁰ Ehrenfest corrigeerde zelfs Burgers' handschrift: 'Lieber Jan! Ihre Handschrift droht jetzt durch ein Optimum von Deutlichkeit hindurch zu gehen [...]'.¹⁷¹ Daarnaast wist hij hem ervan te weerhouden tijdens zijn promotie in 'Bolshewikpak' te verschijnen.

Ehrenfests persoonlijke bemoeienissen met Burgers gingen echter nog veel verder. Op een gegeven moment maakte hij Burgers duidelijk dat hij zijn verloving met Jeanette (Nettie) Roosenschoon afkeurde, en toen het paar in de zomer van 1919 trouwde, namen de spanningen tussen Burgers en Ehrenfest toe. Vanaf dat moment nam Burgers een grotere persoonlijke afstand tot Ehrenfest in acht. Toch bleef er sprake van een goed contact tussen de leermeester en zijn voormalig leerling. Burgers sprak altijd met grote waardering over Ehrenfests bezielende invloed.

Burgers herinnerde zich:

'His analytical mind stirred up everything, so that at times it looked as if nothing would be left as it was. On the long run this pushed his students somewhat away from him, and I have also experienced this effect. There were things which we did not like to have analysed. ... I can enjoy myself with things or in situations without asking whether they have a meaning, whereas Ehrenfest would question every aspect.'¹⁷²

Hendrik Anthony ('Hans') Kramers begon in 1912 aan zijn studie te Leiden. Net als Burgers raakte hij in de ban van Ehrenfest. Die haalde Kramers over om lid te worden van *Christiaan Huygens*, en het door hem verafschuwde, elitaire studentencorps te verlaten.¹⁷³ Ehrenfest zag in Kramers een begaafde student, met een aanzienlijk talent voor formele wiskunde. Wanneer Ehrenfest zelf andere verplichtingen had liet hij Burgers en Kramers het college wel eens overnemen. Maar pas nadat ze het college van tevoren aan Ehrenfest hadden voorgedaan.

Kramers bezat ook sterke interesses buiten de fysica, bijvoorbeeld op literair gebied. Later zou hij uitgroeien tot een

¹⁷⁰ Diverse brieven van Ehrenfest aan J.M. Burgers en ouders Burgers, 17 december 1914–13 december 1918, Burgers Archief TU Delft.

¹⁷¹ Ehrenfest aan J.M. Burgers, 15 augustus 1917, BA.

¹⁷² Burgers, *Autobiographical Notes* (1962) 30.

¹⁷³ Klein, *Paul Ehrenfest* (1970) 9.

Shakespeare-expert. Kramers' brede belangstelling – ook zijn natuurkundig werk toont een wijd scala aan onderwerpen – was mede het gevolg van zijn rusteloze persoonlijkheid.¹⁷⁴ Hij ging gebukt onder persoonlijke problemen en twijfels, een sterke besluiteloosheid en ongerichtheid, gepaard aan een verborgen depressie.¹⁷⁵ Wellicht dat deze overeenkomst op persoonlijk vlak werkelijk contact tussen leerling en leermeester mede in de weg stond. In ieder geval schermde Kramers zijn privé-leven meer voor Ehrenfest af dan Burgers. Wat daarbij meespeelde, was dat hij veel zelfstandiger was dan Burgers.

Kramers was net als Ehrenfest zeker geïnteresseerd in scherpe vragen betreffende de grondslagen van de fysica, maar hij begon daarnaast concrete problemen op te lossen met behulp van geavanceerde wiskundige berekeningen.¹⁷⁶ Dat strookte helemaal niet met Ehrenfests stijl van natuurkundebeoefening. Maar het ergste was in dit geval dat Kramers' uiteenlopende interesses nogal eens conflicteerden met de activiteiten voor zijn studie, met als gevolg dat hij de colleges en colloquia onregelmatig bezocht – iets dat hem volgens Ehrenfest volledig diskwalificeerde als fysicus. Ehrenfest zou hem op zijn doctoraalexamen onverbloemd hebben meegedeeld dat hij ongeschikt was voor het onderzoek en maar leraar moest worden.¹⁷⁷

Na een paar maanden als docent op een Gymnasium te hebben gewerkt, vertrok Kramers in het voorjaar van 1916 zonder enige referentie naar Bohr te Kopenhagen. Daar ontwikkelde hij zich razendsnel tot Bohrs rechterhand. De afstand tot Ehrenfest zorgde, net als bij Burgers, ook bij Kramers kennelijk voor een enigszins verbeterde relatie. In 1919 promoveerde hij bij Ehrenfest op een proefschrift dat gebaseerd was op zijn in Kopenhagen uitgevoerde onderzoek. In 1922 werd hij lector te Kopenhagen.¹⁷⁸ In 1923 publiceerde hij een nieuwe theorie over dispersie en uiteindelijk zou hij via gezamenlijk werk aan dispersie een belangrijke rol spelen in het ontstaan van de matrixmechanica van Heisenberg.

Terecht of niet, Ehrenfest meende dat Kramers' afstandelijkheid het gevolg was van een bepaalde hooghartigheid. Toen hij tijdens een treinreis naar Kopenhagen Kramers rokend het perron op en neer zag

¹⁷⁴ Dresden, *H.A. Kramers* (1987) 90-94.

¹⁷⁵ Dresden, *H.A. Kramers* (1987) 520-523.

¹⁷⁶ Dresden, *H.A. Kramers* (1987) 93.

¹⁷⁷ Dresden, *H.A. Kramers* (1987) 90-94.

¹⁷⁸ M&R 2, 148.

lopen, merkte hij op kenmerkende wijze op: 'Kramers sieht aus, als ob die ganze Welt ihm gehört, er aber viel zu faul sei, sie in Besitz zu nehmen.'¹⁷⁹ Ondanks strubbelingen in het verleden hadden Kramers en Ehrenfest een goede band. Kramers schreef zijn leermeester aan met 'Lieber Ehrenfest' wanneer hij hem weer eens uit de put probeerde te praten. Hij prees Ehrenfest voor de manier waarop hij hem altijd weer verder hielp, bijvoorbeeld via discussies over de door Ehrenfest verafschuwde groepentheorie. 'Ik vind het zoo'n ironie dat je anderen zooveel en jezelf zoo weinig kunt geven', schreef hij hem eens.¹⁸⁰ Ehrenfest zag met genoegen dat Kramers zich door zijn contacten met Bohr, Heisenberg en anderen tot een excellente fysicus had ontwikkeld, en hij bewonderde zijn wiskundige capaciteiten.

In 1926 werd Kramers – na een uitgebreide lobby van Ehrenfest – hoogleraar te Utrecht. Hij kwam regelmatig naar Leiden voor het geven van colleges.¹⁸¹ Ook kwam hij nog vaak over wanneer internationale bezoekers te Leiden op het colloquium kwamen spreken.¹⁸² In 1934 volgde hij Ehrenfest op in Leiden, iets waarvoor Ehrenfest in brieven aan andere faculteitsleden al meerdere malen had gepleit.¹⁸³

Dirk Coster, een andere student van Ehrenfest, was opgeleid als onderwijzer en had als zodanig tussen 1908 en 1913 op verschillende scholen gewerkt. Particuliere hulp maakte het in 1913 mogelijk te gaan studeren aan de Leidse universiteit. Spoedig verscheen hij op de colloquia en werd hij lid van *Christiaan Huygens*. Coster had – mede ingegeven door zijn eenvoudige achtergrond – een enorme geldingsdrang en nam geen blad voor de mond. Tijdens de bijeenkomsten van *Christiaan Huygens* sprak hij tijdens discussies geregeld voor zijn beurt, en een keer trok hij zo fel van leer dat hij naar voren stormde, de voorzitter de voorzittershamer uit handen trok en daarmee uit alle macht enige malen

¹⁷⁹ Ehrenfest aan vrouw en kinderen, 8 april 1929, APE EPC 1, sectie 7.

¹⁸⁰ H.A. Kramers aan Ehrenfest, 18 januari 1929, APE ESC 6, sectie 9.

¹⁸¹ Ehrenfest aan N. Bohr, 15 maart 1928, APE ESC 1, sectie 7; A.D. Fokker aan P. Zeeman, 10 mei 1929, APE ESC 4, sectie 7.

¹⁸² Ehrenfest aan F. London, 30 september 1928, APE ESC 7, sectie 3.

¹⁸³ Zie bijvoorbeeld: Ehrenfest aan De Sitter, 16 november 1929, APE ESC 9, sectie 5; Ehrenfest aan Van der Woude, De Sitter, De Haas en Fokker, 26 juli 1931, APE ESC 10, sectie 8. beide brieven werden geschreven voor aanvang van een lange reis, waarbij Ehrenfest de behoefte had om van te voren, mocht hem iets gebeuren, te laten weten wie het meest geschikt was als zijn opvolger. Kramers stond in beide genoemde brieven op nummer 1.

op tafel sloeg.¹⁸⁴ Coster was actief socialist en medeoprichter en voorzitter van de *Studenten-vereiniging tot studie van het socialisme*.

Aangemoedigd door Ehrenfest legde hij al in 1916 het doctoraalexamen in de theoretische natuurkunde af. Hij richtte zich ook op de experimentele natuurkunde: hij vertrok naar Delft om elektrotechniek te studeren en werd daar assistent van W.J. de Haas. In 1920 vertrok hij met een beurs van het *Van Vollenhovenfonds* naar Zweden om in Lund onderzoek te verrichten aan röntgenlijnspectra van diverse elementen. In 1922 werkte Coster een jaar bij Bohr in Kopenhagen en beschreef in een gezamenlijk artikel hoe Bohrs theorie van het periodiek systeem aan de hand van de Röntgenspectra bevestigd en aangevuld kon worden. Dit werk resulteerde ook in de ontdekking van het element Hafnium, dat werd gezien als een fantastische bevestiging van Bohrs atoomtheorie.¹⁸⁵

In 1922 promoveerde Coster op *Röntgenspectra en de atoomtheorie van Bohr*. In 1923 was hij een jaar conservator van Teylers Laboratorium, en in 1924 werd hij te Groningen de opvolger van W.J. de Haas. Naast zijn werk aan Röntgenspectra werkte hij in Groningen aan de ontsluiting van nieuwere gebieden, zoals het gebied van de bandenspectra, waar hij samen met Gerhard Dieke, een andere voormalige student van Ehrenfest, aan werkte. Ook met de door Ehrenfest naar Nederland gehaalde R. de Laer Kronig ging Coster een vruchtbare samenwerking aan, en wel op het terrein van de detailstructuur van Röntgenabsorptiespectra. Al voor de oorlog traden bij Coster verschijnselen van MS op – tot 1949 bleef hij ondanks zijn ziekte en inmiddels gekluisterd aan een rolstoel zijn colleges geven.¹⁸⁶ De basis van zijn succesvolle werk, en zelfs van zijn persoonlijke ontwikkeling, werd door Coster toegeschreven aan Ehrenfests tomeloze inzet en steun:

‘Het voorbeeld en de vriendschap van Professor Ehrenfest zijn in Leiden van beslissende invloed op mijn leven geweest.’¹⁸⁷

¹⁸⁴ Notulen Dispuut Christiaan Huygens, notulenboek F7.

¹⁸⁵ Kragh, *Quantum Generations* (1999) 157.

¹⁸⁶ Kramers, ‘Levensbericht van Dirk Coster’ (1951-1952) 198-201; Baneke, *De Groningse eeuw van de natuurwetenschappen* (2005) 39-40.

¹⁸⁷ Geciteerd in: Kramers, ‘Levensbericht van Dirk Coster’ (1951-1952) 198-201, m.n. 198.

Gerhard Dieke was in 1920 gaan studeren in Leiden. Hij werd al snel Ehrenfests assistent. In de herfst van 1924 verbleef ook hij enige tijd bij Bohr in Kopenhagen. Na het behalen van zijn doctoraal in 1925 vertrok hij naar het lab van de Amerikaanse fysicus Birge, die te Berkeley een belangrijk centrum voor moleculaire spectroscopie had gevestigd. Niet alleen was het lab waarschijnlijk een van de best toegeruste in de Verenigde Staten, Birge gold ook nog eens als één van de Amerikaanse pioniers van de nieuwe quantumtheorie.¹⁸⁸ In 1926 promoveerde Dieke te Berkeley. Daarna vertrok hij voor twee jaar naar Pasadena en Tokio om spectroscopisch onderzoek te doen. In 1928 werd hij conservator en lector te Groningen onder Coster. In 1930 kreeg hij een positie aan de Johns Hopkins University in Baltimore.¹⁸⁹

In 1919 kwam de 17 jaar oude Samuel ('Sem') Goudsmit studeren te Leiden. In 1921 werd hij door Ehrenfest uitgenodigd op het colloquium. Goudsmit verdiepte zich in de fijnstructuur van spectra en publiceerde daarover al in datzelfde jaar. Zijn interesse lag op het grensgebied van de experimentele en theoretische natuurkunde, en hij werkte vanaf september 1924 enkele dagen per week als assistent bij de experimenteel fysicus Zeeman te Amsterdam. Hij legde in 1925 zijn doctoralexamen af, waarna hij door Ehrenfest enkele weken naar Bohr werd gestuurd. Na verdere werkzaamheden in Amsterdam en Leiden bezocht hij van oktober 1926 tot juli 1927 Tübingen en Kopenhagen.¹⁹⁰ In Tübingen verdiepte hij zich op aanraden van Ehrenfest in de experimentele spectroscopie op het optisch laboratorium van Back en Paschen. In 1925 was Goudsmit door bemiddeling van Ehrenfest in contact gekomen met Uhlenbeck; een ontmoeting die hun beider leven veranderde.

George Eugene Uhlenbeck was in 1918 te Delft gaan studeren, maar hij stapte in 1919 over naar wis- en natuurkunde aan de Leidse universiteit. In 1921 werd hij tot het colloquium toegelaten. Als student werkte hij als leraar op een middelbare school om in zijn levensonderhoud en kamerhuur te Leiden te kunnen voorzien. Toen Ehrenfest op een dag het college begon met de vraag wie er geïnteresseerd was in een baantje als huisleraar te Rome, stak Uhlenbeck zijn hand op. Zodoende werkte hij van september 1922 tot juni 1925 in

¹⁸⁸ Sopka, *Quantum physics in America* (1988) 109.

¹⁸⁹ Cattell, *American men of science I* (1955) 469.

¹⁹⁰ Goudsmit, *Atoommodel en structuur der spectra* (1927) ix; Ehrenfest aan S. Chapman, z.d. 1928, APE ESC 4, sectie 10.

Rome als huisleraar van de zoon van de Nederlandse gezant. 's Zomers was hij in Nederland en door hard te werken wist hij in 1923 zijn doctoraal te behalen.¹⁹¹ Datzelfde jaar werd hij met een aantal vragen van Ehrenfest naar Fermi te Rome gestuurd. Dit was het begin van een nauw contact met Fermi gedurende Uhlenbecks verblijf te Rome.

Maar hij raakte er ook zeer geïnteresseerd in cultuurgeschiedenis. Hij werd een frequent bezoeker van het Nederlandsch Historisch Instituut te Rome en las de boeken van de beroemde Leidse historicus Johan Huizinga. Een oom die hoogleraar Sanskriet te Leiden was, raadde Uhlenbeck echter aan te promoveren in de fysica, hetgeen meer praktisch leek. Tussen historisch onderzoek en het leren van Latijn door werkte hij samen met Goudsmit om kennis van de nieuwste ontwikkelingen op te doen. In de herfst van 1925 volgde hij Dirk Struik op als assistent van Ehrenfest. Gezamenlijk publiceerden Uhlenbeck en Ehrenfest vier artikelen.

Ehrenfest wilde graag dat zijn studenten paarsgewijs samenwerkten. Hij reageerde welwillend op Uhlenbecks geschiedenisprojecten, maar suggereerde dat hij door Goudsmit zou worden onderwezen in de nieuwste ontwikkelingen.¹⁹² Ze kregen de opdracht om zich samen te verdiepen in spectraallijnen. Binnen enkele maanden kwamen Goudsmit en Uhlenbeck met de hypothese van de elektronspin; een ontdekking die zowel hen beiden als het Theoretisch Instituut te Leiden een enorm prestige opleverde. Uhlenbeck liet vrijwel meteen alle historische aspiraties varen. De onconventionele Ehrenfest wilde graag dat Uhlenbeck en Goudsmit tegelijkertijd promoveerden op hun werk aan atoomspectra, wat in 1927 geschiedde, ondanks enige tegenstand van zijn collega's. Beiden waren toen al verzekerd van een door Ehrenfest geregelde baan in de VS.¹⁹³ Uhlenbeck werd ook voor een periode naar Kramers in Utrecht gestuurd.¹⁹⁴ Later zou hij Kramers in Utrecht opvolgen. Ook Uhlenbeck sprak uit sterk beïnvloed te zijn door Ehrenfest, en hem als een voorbeeld te zien als fysicus en leraar. Zoals al eerder opgemerkt had Uhlenbeck – naast zijn familiefoto's – altijd een foto van Ehrenfest op zijn bureau.

Arend Joan Rutgers (1903-1998) studeerde scheikunde aan de Gemeentelijke Universiteit van Amsterdam. Na zijn doctoralexamen in

¹⁹¹ Pais, *The Genius of Science* (2000) 295.

¹⁹² Pais, *The Genius of Science* (2000) 297; M&R 2.1, 698.

¹⁹³ Pais, *The Genius of Science* (2000) 308-309.

¹⁹⁴ Ehrenfest aan L. Nordheim, 28 september 1929, APE ESC 8, sectie 1.

1926 ging hij naar Leiden om theoretische natuurkunde te studeren bij Ehrenfest, bij wie hij in 1930 promoveerde. In 1931 werd hij aan de Gemeentelijke Universiteit van Amsterdam aangesteld als hoofdassistent op het experimentele laboratorium van Michels. Daar werd hij de steun en toeverlaat op het gebied van theoretische kwesties. In 1933 werd hij gevraagd om aan de universiteit van Gent als eerste afzonderlijke colleges fysische chemie te geven. Door een Gents gasthoogleraarschap van H.R. Kruyt in 1935-1936 werd Rutgers gegrepen door de colloïdchemie en de grensvlakchemie. Hij bouwde hierin een bloeiende school op, die decennia lang zou floreren. In 1938 werd hij bevorderd tot hoogleraar fysische chemie. In 1974 ging hij met emeritaat.¹⁹⁵

Hendrik Brugt Gerhard Casimir, zoon van de eerder genoemde pedagoog Rommert Casimir, begon zijn studie in 1926. Hij viel Ehrenfest meteen op, hoewel hij volgens hem nog wel de neiging had om te vervallen in mathematische virtuositeit. Hij was net zo begaafd als Kramers als student was geweest. Ehrenfest achtte een verblijf bij Bohr nuttig, omdat Bohr zijn assistenten dwong om alle formules van alle kanten te begrijpen. Toen in 1929 Bohrs assistent Klein vertrok stelde Ehrenfest Bohr voor om Casimir als assistent aan te nemen. Ehrenfest schreef zo onder de indruk te zijn van Casimirs capaciteiten, dat hij hem het meest geschikt achtte de toekomstige opvolger van Lorentz en hemzelf te worden – zij het dat Casimir nog de nodige vorming moest ondergaan bij Bohr, voor wie Casimir overigens een grote hulp bleek te zijn.¹⁹⁶ Trots constateerde Ehrenfest dan ook: ‘[Bohr kann] jetzt überhaupt kein Bein mehr ohne ihn bewegen.’¹⁹⁷

Twee jaar lang zou Casimir grotendeels in Kopenhagen blijven. Vanaf september 1931 werkte hij als assistent van Ehrenfest, bij wie hij ook promoveerde. In 1932 werd hij door Ehrenfest voor een periode van twee maanden als theoretisch assistent naar het kernfysisch laboratorium van Lise Meitner gestuurd. Voor Ehrenfest had dat een tweeledig doel: Leiden kon zo contact krijgen met de kernfysica, en Casimir kreeg de mogelijkheid om verder te groeien.¹⁹⁸ In Berlijn ontving Casimir een

¹⁹⁵ Overbeek, ‘Levensbericht A.J. Rutgers’ (2000) 55-60.

¹⁹⁶ Ehrenfest aan N. Bohr, 24 februari 1929; N. Bohr aan Ehrenfest, 22 maart 1929, APE ESC 1, sectie 7; Margarethe Bohr aan Ehrenfest, 28 april 1929; Ehrenfest aan Margarethe Bohr, 3 mei 1929, APE ESC 1, sectie 8.

¹⁹⁷ Ehrenfest aan Ph. Kohnstamm, 13 juli 1929, APE ESC 6, sectie 8.

¹⁹⁸ Ehrenfest aan L. Meitner, 19 mei 1932; L. Meitner aan Ehrenfest, APE ESC 8, sectie 1.

uitnodiging om te Zürich assistent van Pauli te worden. In september 1933 keerde hij terug naar Leiden. Na Ehrenfests overlijden hield hij zo goed en zo kwaad als dat ging de zaak draaiende tot Kramers werd aangesteld. In 1935 werd hij conservator van het Kamerlingh Onnes Laboratorium en in 1938 bijzonder hoogleraar. In 1942 vertrok hij naar het Philips NatLab, waar hij in 1946 mededirecteur werd. Van 1956 tot 1972 had hij de leiding over alle researchactiviteiten van Philips.¹⁹⁹ In zijn autobiografie zou Casimir een reeks roerende passages wijden aan Ehrenfest.

Roelf Krans was evenals Rutgers afkomstig van de Amsterdamse universiteit. Ze waren allebei door Goudsmit geweest op het Leidse colloquium. In 1926 maakte Krans samen met Rutgers de overstap naar Leiden en in 1928 werden ze beiden assistent van Ehrenfest. Hoewel Ehrenfest altijd prettig samenwerkte met Krans, had hij, zo meende hij zelf, de blunder begaan Rutgers en Krans op gegeven moment twee verschillende richtingen op te laten gaan. Zo konden ze niet meer met elkaar discussiëren. Vooral voor Krans was dat een reden voor een aanzienlijke vertraging. Tot overmaat van ramp vertrok Ehrenfest voor een reis naar Amerika, en was hij dus geruime tijd verstoken van zijn promotor. Krans gaf aan onder leiding van Fokker verder te willen werken tot Ehrenfest was teruggekeerd.²⁰⁰ Ehrenfests verblijf duurde 8 maanden, waarna Krans zijn voortslepende dissertatie eindelijk kon afronden. Na zijn promotie in 1931 werd hij leraar in Arnhem. Later zou hij didactiek van de natuurkunde doceren te Utrecht en Groningen en aan de VU. Ook schreef hij een groot aantal natuurkundeleerboeken voor het middelbaar onderwijs.²⁰¹

Over Ehrenfests promovendus Henry Florin is weinig bekend. In 1929 werd hij leraar.²⁰² Hierna begon hij aan een proefschrift, waarin hij de operatorenrekening van Heaviside op een rij zette en haar verband en toepassing binnen de quantummechanica onderzocht. Pas na Ehrenfests dood zou Florin promoveren. In 1934 trad Fokker als officieel promotor op.²⁰³

Met Jan Tinbergen had Ehrenfest een toekomstige Nobelprijswinnaar onder zijn hoede, zij het op het gebied van de

¹⁹⁹ Polder, 'Levensbericht H.B.G. Casimir'(2001) 13-22.

²⁰⁰ Ehrenfest aan A.D. Fokker, 17 april 1930, APE ESC 4, sectie 5.

²⁰¹ *Wie is dat?* (1956) 23.

²⁰² Ehrenfest aan L. Nordheim, 28 september 1929, APE ESC 8, sectie 1.

²⁰³ Florin, *Die methoden der Heavisideschen Operatorenrechnung* (1934) ix.

economie. Op Tinbergens curieuze carrière en de stimulans die hij van Ehrenfest ontving op het gebied van de economie, zal ik in een later hoofdstuk apart ingaan.

Ehrenfest had net als Boltzmann een innige band met zijn leerlingen, en zijn inzet voor zijn leerlingen dreef hen tot grote hoogten. Zoals gezegd kwam het voor velen van hen in het laatste stadium van hun samenwerking met Ehrenfest tot enige frictie, waarna een wat grotere persoonlijke afstand tot stand kwam. Ehrenfest gedroeg zich ten opzichte van hen als een vader die wist wat het beste was voor zijn kinderen. Een vergelijking met de adolescentie is dan ook op zijn plaats: adolescenten moeten zich eerst afzetten tegen hun ouders om zich uit hun invloedssfeer los te maken en hun eigen individualiteit volledig te ontplooiën, waarna het contact tussen ouders en kinderen meestal beter wordt, op basis van gelijkwaardigheid. Burgers en Kramers vormen hiervan een goed voorbeeld. Wellicht heeft Ehrenfest zelf ook zo het zich losmaken van Boltzmann ervaren toen hij promoveerde; hij meende pas tot volledige ontplooiing gekomen te zijn na het bezoek aan Göttingen – niet toevallig ver weg van Boltzmanns invloedssfeer.

De basis van de successen van Ehrenfests promovendi was – naast het zeer persoonlijke contact tussen leraar en leerlingen – het strenge selectieproces; Ehrenfest koos een beperkt aantal leerlingen uit een toch al klein aanbod van studenten in de natuurwetenschappen. Dit kan ook het ontbreken van promoties tussen de jaren 1918 en 1922 verklaren; Ehrenfests veeleisendheid leverde in die jaren wellicht geen geschikte kandidaten op. Ehrenfest vereiste een constante inzet en een hoog werktempo. Over het algemeen leverde dit kweekproces uitstekende fysici op, die zeer intuïtief werkten, maar die niet allemaal bedreven waren in het uitvoeren van gecompliceerde wiskundige berekeningen. Wiskundige talenten als Burgers, Kramers en Casimir leerden zichzelf gecompliceerde berekeningen uitvoeren, of leerden dat door hun contacten met buitenlandse wetenschappers als Heisenberg en Pauli. Wat ook opvalt is dat veel van Ehrenfests studenten – zoals Burgers, Coster, Dieke, Goudsmit, en in een latere fase Casimir – zich niet alleen op theoretisch werk, maar ook op experimentele fysica richtten. Dit werd door Ehrenfest sterk aangemoedigd; een bredere ontwikkeling betekende ook betere toekomstmogelijkheden, onder andere in de industrie, waarover we meer zullen lezen in hoofdstuk 5. Ik zal in de paragraaf hieronder dieper ingaan op de vele manieren waarop

Ehrenfest zich bekommerde om zijn studenten in alle fases van hun carrière bij te staan.

Bemiddeling voor studenten

Ehrenfest bleef zijn studenten ook tijdens hun verdere loopbaan ondersteunen en ging hierin soms heel ver. Hoewel dit aspect strikt genomen geen deel uitmaakt van zijn onderwijsactiviteiten geeft het wel een goed beeld van de meester-leerling-verhouding en verdient het aldus enige nadere aandacht.

Een sprekend voorbeeld van Ehrenfests inspanningen voor zijn studenten vormt de kwestie van Ornsteins opvolging te Utrecht in 1925. Ornstein was formeel nog hoogleraar theoretische fysica, maar hij nam al geruime tijd het laboratoriumdirectoraat van de hoogleraar experimentele fysica Julius waar. Hij vervulde uiteindelijk de theoretische leerstoel voor de vacant gekomen experimentele leerstoel van Julius. Deze overstap leverde hem nu ook officieel het bijbehorende directoraat van het laboratorium op. Zodoende kwam er te Utrecht een leerstoel in de theoretische fysica vrij. Ornstein had zijn medewerker Burger daarvoor op het oog. Ehrenfest mobiliseerde onmiddellijk Einstein, Bohr, Lorentz, Planck en Paschen om voor de kandidatuur van de in Kopenhagen werkzame Kramers te pleiten. Einstein ontmoette Ornstein te München en gaf hem zijn mening over de zaak. Toen dit tevergeefs bleek, kreeg Franck, die op doorreis was naar Oxford, van Ehrenfest de opdracht om Ornstein in Utrecht op te zoeken en bij hem te pleiten voor Kramers' kandidatuur.

Zo sterk had Ehrenfest zijn zinnen gezet op een Nederlandse leerstoel voor Kramers, dat hij uiteindelijk besloot zijn eigen leerstoel te 'offeren', zodat Kramers deze kon bekleden; Ehrenfest zou dan in Kramers' plaats naar Utrecht gaan. De Utrechtse chemicus Kruyt reageerde enthousiast op dit voorstel.²⁰⁴ Ook Ornstein ontving het plan met instemming. Coster waarschuwde Ehrenfest echter dat Ornsteins belangstelling voor Ehrenfest slechts een tactische zet was om te laten

²⁰⁴ Ehrenfest aan N. Bohr, 27 september 1925; 11 oktober 1925; N. Bohr aan Ehrenfest, 14 oktober 1925, ESC 1, sectie 7; Ehrenfest aan D. Coster, 1 oktober 1925, APE ESC 2, sectie 10; Ehrenfest aan H.R. Kruyt en E.J. Cohen, 20 september 1925; Ehrenfest aan H.R. Kruyt, 27 september 1925; H.R. Kruyt aan Ehrenfest, 9 oktober 1925, APE ESC 6, sectie 10.

zien dat het hem schijnbaar niet om de persoon ging. Maar Ornstein wilde ‘met zijn klikje onder elkaar blijven’, en zodoende luidde Costers advies: ‘U moet uit Ornstein zijn klauwen blijven.’²⁰⁵ Inderdaad meende Ornstein dat ‘de twee professoraten het recht zijn van de “Firma Ornstein-Burger”’.²⁰⁶

Ehrenfest schreef daarop dat hij zijn eigen vaardigheid en kennis ondergeschikt achtte aan de hoge fysieke kwaliteiten van Kramers. Ook Kramers’ vaardigheden als docent werden door Ehrenfest hooggeschat. Hij wilde wel zeker weten of Kramers net als hijzelf uit een innerlijke drang op zoek zou gaan naar jonge talenten onder de jongerejaars studenten. De onderwijskundige kwaliteiten van een kandidaat speelden voor Ehrenfest een even grote rol als de natuurkundige merites.²⁰⁷ Toen duidelijk werd dat zijn lobby voor Kramers succes had, trok hij zichzelf terug als kandidaat voor de Utrechtse leerstoel. Al zou dat besluit ‘bijna zeker ten nadeel van den bloei der Theor[etische] Natuurk[unde] in Leiden’ uitpakken, zo schreef hij aan Lorentz.²⁰⁸ In 1926 werd Kramers hoogleraar te Utrecht.

In 1928 kreeg Ehrenfest de kans om Coster te hulp te schieten. Er werd namelijk getracht om Coster van Groningen naar Amsterdam te halen, als opvolger van de overleden Sissingh. Ehrenfest greep deze mogelijkheid aan en stuurde onmiddellijk een brief naar het curatorium van de Groningse Universiteit, waarin hij meldde dat hij Coster had genoemd als eerste kandidaat voor Amsterdam. Hij suggereerde dat er kans zou zijn dat Coster kon blijven wanneer er een reiskostenbudget beschikbaar zou komen om meer studenten naar Groningen te lokken alsmede geld voor het uitnodigen van sprekers en het bezoeken van colloquia aan andere universiteiten.²⁰⁹

Ehrenfest was in het geheel niet van plan om Coster werkelijk aan Amsterdam aan te bevelen. In Amsterdam was Coster een nieuw laboratorium beloofd, maar dat zou minstens twee jaar hervormingen en verbouwingen kosten, wat wel veel mogelijkheden schiep, maar geen tijd voor onderzoek liet. Bovendien was Coster steeds meer vermoeid; zijn

²⁰⁵ D. Coster aan Ehrenfest, 3 oktober 1925, APE ESC 2, sectie 10.

²⁰⁶ L.S. Ornstein aan Ehrenfest, 18 oktober 1925, APE ESC 8, sectie 5.

²⁰⁷ Ehrenfest aan D. Coster, 1 oktober 1925, APE ESC 2, sectie 10.

²⁰⁸ Ehrenfest aan H.A. Lorentz, 16 oktober 1925, APE ESC 7, sectie 8.

²⁰⁹ Ehrenfest aan Ten Bruggencate, 3 april 1928, APE ESC 2, sectie 10.

MS begon zijn tol te eisen.²¹⁰ Niet alleen bij de Groningse universiteit, maar ook door directe bemiddeling bij het ministerie probeerde Ehrenfest een speciaal budget voor Coster en zijn medewerkers te regelen om het geografische isolement van Groningen te compenseren.²¹¹ Hij zorgde er via het Lorentzfonds voor dat Coster en Zernike een vast reiskostenkrediet²¹² en samen met Leiden een colloquiumkrediet kregen.²¹³

De situatie in Groningen was volgens Coster ook in een ander opzicht zorgelijk; het laboratorium moest dringend onder handen genomen worden. Hij vroeg zijn oude leermeester om hulp. Wellicht zou Ehrenfest De Haas kunnen bewegen enig overtollig instrumentarium over te nemen, zodat er wat geld kwam voor het laboratorium in Groningen. Daar was echter vooral behoefte aan geschikte mensen. De toestand was volgens Coster zo slecht, dat haast iedere maatregel een verbetering was. Een geplande verbouwing werd keer op keer uitgesteld. Van 'een van de trawanten van Ornstein' – tussen Groningen en Utrecht heerste een zekere rivaliteit – kreeg Coster de indruk dat Ornstein achter de vertraging zat; iemand scheen de regering te bewerken de hele faculteit in Groningen op te doeken.²¹⁴ Ehrenfests hulp bij het bestrijden van het Groningse isolement en het opkalefateren van het laboratorium was dan ook meer dan welkom.

Ehrenfests advies over het al dan niet accepteren van posities werd hoog aangeslagen door zijn studenten. Toen Goudsmit – die al enige tijd in Amerika verbleef – een aanbod kreeg voor een nieuwe positie daar, liet hij zijn beoogde werkgever weten dat een eventueel accepteren van het voorstel afhing van het advies van zijn voormalige leraar.²¹⁵ Toen Goudsmit daar bovenop ook een aanbod uit Londen kreeg, adviseerde Ehrenfest het Amerikaanse aanbod aan te nemen. Een verkorting van het verblijf in Amerika zou de banenkansen van andere Nederlandse fysici schaden; wanneer bleek dat de Nederlandse fysici niet honkvast genoeg waren, zouden Amerikaanse universiteiten wel eens

²¹⁰ Ehrenfest aan G.E. Uhlenbeck en S.A. Goudsmit, 11 april 1928, APE ESC 10, sectie 2.

²¹¹ Paul Ehrenfest aan G. Uhlenbeck en S. Goudsmit, 11 april 1928, APE ESC 10, sectie 2.

²¹² A.D. Fokker aan Paul Ehrenfest, 29 maart 1928, APE ESC 4, sectie 4; A.D. Fokker aan Paul Ehrenfest, 26 april 1930, APE ESC 4, sectie 5.

²¹³ A.D. Fokker aan Paul Ehrenfest, 3 juli 1931, APE ESC 4, sectie 5.

²¹⁴ D. Coster aan Ehrenfest, 30 september 1928, APE ESC 3, sectie 1.

²¹⁵ S.A. Goudsmit aan S. Chapman, 23 april 1928, APE ESC 4, sectie 10.

terughoudender kunnen worden in het aanstellen van jonge Nederlandse natuurkundigen.²¹⁶

Toen Walter Colby in het voorjaar van 1927 naar Europa kwam om iemand te zoeken die de in Ann Arbor, Michigan, werkende Oskar Klein kon opvolgen, kwam hij ook bij Ehrenfest langs. In het bijzijn van Goudsmit en Uhlenbeck hield Ehrenfest een vurig pleidooi voor het aannemen van niet één, maar twee of meer fysici. Ann Arbor was verstoken van andere theoretisch natuurkundigen, en een enkele daar aangestelde fysicus had niemand om mee te discussiëren, wat volgens Ehrenfest stagnatie van de wetenschappelijke ontwikkeling zou betekenen. Ehrenfest maakte met zijn pleidooi een enorme indruk op Colby, die enkele weken later zowel Goudsmit als Uhlenbeck een baan aanbood. Beiden accepteerden.²¹⁷

Overigens liet Ehrenfest overduidelijk merken dat hij wenste dat Goudsmit in de toekomst weer naar Nederland zou komen. Die gelegenheid deed zich voor na het overlijden van de Amsterdamse fysicus Sissingh. Er was sprake van een dubbele vacature, aangezien Kohnstamm zijn leerstoel vaarwel zei. Ehrenfest had Burgers eerder gepolst voor de vacature Sissingh en geprobeerd Burgers over te halen zijn Delftse positie op te geven en weer terug te keren naar de fysica, maar deze bedankte. Ehrenfest probeerde nu Goudsmit als opvolger van Sissingh, naast Michels als opvolger van Kohnstamm te positioneren. Echter, de Amsterdamse mathematici (volgens Ehrenfest met L.E.J. Brouwer voorop) zagen Michels niet zitten en serveerden ieder plan af waarbij Michels een kans maakte. Michels' industriële contacten diskwalificeerden hem in de ogen van de mathematici voor een positie als hoogleraar.²¹⁸

Ook andere dan zijn eigen studenten profiteerden van Ehrenfests bemiddelingen. Zo ervoer de broer van Jan Tinbergen, Niko, eveneens zijn stimulerende invloed. Toen Niko twijfelde wat hij zou gaan doen en of hij wel naar de universiteit wilde gaan, schakelde zijn familie Ehrenfest in, met als resultaat dat hij werd overgehaald om een paar maanden door te brengen op een biologisch veldstation. Ehrenfest

²¹⁶ Ehrenfest aan S.A. Goudsmit, 30 april 1928, APE ESC 4, sectie 10.

²¹⁷ Pais, *The Genius of Science* (2000) 308-309.

²¹⁸ Ehrenfest aan S.A. Goudsmit, 14 mei 1928, APE ESC 4, sectie 10; D. Coster aan Ehrenfest, 14 februari 1929, APE ESC 3, sectie 2; Ehrenfest aan J.M. Burgers, 6 mei 1928, 13 mei 1928, BA. Zie voor de opvolgingskwestie rond Sissingh en Kohnstamm ook: Maas, *Atomisme en individualisme* (2001) 161-183.

schreef een brief aan de Duitse hoogleraar Johannes Thienemann, directeur van het eerste instituut voor vogeltrek te Rossitten, in Oost-Pruisen (tegenwoordig Rybatschi, Rusland). Volgens Niko Tinbergen was dit verblijf in het buitenland bepalend voor zijn besluit om te gaan studeren en zich op de ethologie te richten.²¹⁹ Niko Tinbergen zou vervolgens een autoriteit in dit vakgebied worden en de Nobelprijs voor geneeskunde en fysiologie ontvangen voor zijn ethologisch onderzoek.

In 1917 was Herman Zanstra afgestudeerd als chemisch ingenieur te Delft, waarna hij twee jaar werkte als technisch assistent. Zijn werkelijke interesse lag echter op het gebied van de theoretische fysica, en na twee jaar als docent op een middelbare school te hebben gewerkt schreef hij zijn eerste artikel. Zanstra was inmiddels in contact gekomen met Ehrenfest, die Zanstra onder zijn hoede nam en zijn artikel in 1921 aanbood voor publicatie in de *Proceedings* van de Koninklijke Akademie.²²⁰ Waarschijnlijk door zijn toedoen kwam Zanstra in 1921 als promovendus bij de theoretisch fysisch W.F.G. Swann aan de University of Minnesota terecht.²²¹ Door bemiddeling van Ehrenfest en Sommerfeld werd Zanstra vervolgens in 1924 naar Pauli gestuurd om bekend te raken met de natuurkundige denkwijzen en problemen van de quantumtheorie en de quantumstatistiek, die hij later met veel succes op astrofysische problemen zou toepassen.²²² In 1925 vertrok hij naar het California Institute of Technology, waar hij werd begeleid door Ehrenfests voormalige assistent Paul Epstein. Na diverse aanstellingen in Nederland, Amerika en Zuid-Afrika werd Zanstra in 1946 hoogleraar

²¹⁹ Kruuk, *Niko's natuur. Een biografie van Niko Tinbergen* (2007) 58. Kruuk nuanceert het beeld dat Niko Tinbergen zelf van deze periode had, door op te merken dat de in Duitsland gestationeerde Niko Tinbergen in de brieven naar huis amper over wetenschap sprak. Ook in artikelen uit deze periode komt wetenschap amper aan bod. Dit hoeft echter in het geheel geen afbreuk te doen aan het belang die de indrukken, opgedaan tijdens deze gistingperiode, hadden voor het uiteindelijke besluit te kiezen voor een universitaire studie en de ethologie.

²²⁰ Zanstra, 'Motion relativated by means of a hypothesis of A. Föpl' (Communicated by Prof. P. Ehrenfest at the meeting of March 26, 1921), *Proceedings KAW* 23 (1922) 1412-1418.

²²¹ Ehrenfest correspondeerde in ieder geval vanaf 1911 met Swann. In het Ehrenfest Archief ontbreekt een groot stuk correspondentie van de vroege jaren twintig, waardoor de Swann correspondentie pas vanaf 1929 weer te volgen is.

²²² H. Zanstra aan Ehrenfest, 5 juli 1928, APE ESC 10, sectie 8.

astronomie en directeur van het Sterrenkundig Instituut aan de Universiteit van Amsterdam.²²³

Ehrenfest ontving graag buitenlandse studenten in Leiden, waarvan een aantal langdurig in Leiden bleef – vaak als Ehrenfests assistent. Een aantal buitenlanders komen in een ander hoofdstuk aan bod. Hier besteden we aandacht aan één van hen, omdat deze een succesvolle carrière in Nederland zou opbouwen. Het gaat om de Duits-Amerikaanse fysicus Ralph de Laer Kronig, die in 1924 op uitnodiging van Ehrenfest naar Leiden was gekomen. Als zoon van Duits-Amerikaanse ouders had Kronig het Gymnasium in Dresden bezocht en experimentele natuurkunde gestudeerd bij A.P. Wills aan Columbia University. Met een beurs op zak vertrok hij vervolgens naar Europa, waar hij vanaf 1924 verschillende universiteiten bezocht. In Cambridge kwam hij Ehrenfest tegen, die hem uitnodigde om naar Leiden te komen.

Kronig had in de VS de spectroscopie bestudeerd. Eenmaal in Leiden schreef hij samen met Goudsmit een artikel over de theoretische afleiding van intensiteit-somregels.²²⁴ Toen Landé Leiden bezocht, nodigde hij Kronig uit om naar Tübingen te komen. In Tübingen kwam Kronig op het idee van de elektronspin. Hij legde zijn hypothese voor aan Pauli die toen Tübingen bezocht. Pauli wees zijn idee echter resoluut en heftig van de hand. Kronig besloot daarop zijn suggestie niet te publiceren. In Kopenhagen kreeg hij van Kramers en Heisenberg ook weinig steun, en Kronig liet het er bij zitten.

Niet veel later durfden Uhlenbeck en Goudsmit het gewaagde idee over het draaiende elektron wel te publiceren nadat ze hier door Ehrenfest nadrukkelijk om gevraagd waren.²²⁵ Toen Uhlenbeck van Kronigs oorspronkelijke idee hoorde, erkende hij onmiddellijk het belang van Kronigs werk. Veel van Kronigs overwegingen kwamen overeen met wat Uhlenbeck en Goudsmit in hun artikel hadden gepubliceerd. Het kwaad was echter geschied, en Uhlenbeck en Goudsmit stonden voortaan te boek als de ontdekkers van de spin. Onder fysici circuleerde het

²²³ Plaskett, 'Herman Zanstra' (1974) 59-66; Osterbrock, 'Herman Zanstra, Donald H. Menzel, and the Zanstra method of nebular astrophysics' (2001) 93-108.

²²⁴ Goudsmit en De Laer Kronig, 'Die Intensität der Zeemankomponenten' (1925) 90.

²²⁵ M&R 1.2, 690-694.

puntige rijmpje: 'Der Kronig hätt' den Spin entdeckt; hätt' Pauli ihn nicht abgeschreckt'.²²⁶

Na bezoeken en assistentschappen bij Bohr en Pauli en een aanstelling aan het Imperial College, Londen, werd Kronig in 1930 conservator van het natuurkundig laboratorium te Groningen, van 1931 tot 1939 lector in de mechanica en quantummechanica, en van 1939 tot 1969 hoogleraar theoretische fysica aan de Technische Hogeschool (later Universiteit) Delft.²²⁷

Ehrenfest hielp meerdere malen Nederlandse studenten uit de brand door gebruik te maken van een fonds dat door Einstein ter beschikking was gesteld voor hulp aan de Leidse theoretische fysica. Dat belette Ehrenfest overigens niet om het geld ook aan te wenden voor andere doeleinden. Toen Coster de Leidse student Van Zuylen naar zijn experimentele afdeling in Groningen wilde halen, vroeg hij daar 250 gulden voor bij Ehrenfest. Deze betrok het geld van Einsteins rekening, maar benadrukte dat dit een uitzondering was.²²⁸ Desondanks gebruikte Ehrenfest het geld van Einsteins rekening in 1931 ook om zijn leerling Tinbergen van 75 gulden te voorzien voor een bezoek aan het economisch congres te Lausanne. Het was overduidelijk dat Einstein hier niets van wist – Ehrenfest drukte Tinbergen op het hart Einstein vooral niet te bedanken.²²⁹

Invloed op de Nederlandse natuurkunde

Wat was de betekenis van Ehrenfests onderwijsinspanningen voor de Nederlandse fysica? Die vraag kan het best worden beantwoord met de constatering dat de moderne natuurkunde grotendeels door Ehrenfest en zijn leerlingen in Nederland werd geïntroduceerd. Dit kan aanschouwelijk worden gemaakt via een overzicht van de ontwikkeling van de Nederlandse theoretische natuurkunde.

²²⁶ Hermann, Von Meyenn, Weisskopf, *Wolfgang Pauli. Wissenschaftlicher Briefwechsel I* (1979) vi.

²²⁷ M&R 1.2, 690.

²²⁸ Zie: D. Coster aan Ehrenfest, 2 juli 1928; Ehrenfest aan A.D. Fokker, 3 juli 1928; Ehrenfest aan D. Coster, 3 juli 1928, APE ESC 2 sectie 10; Ehrenfest aan D. Coster, 13 juli 1928, APE ESC 3, sectie 1.

²²⁹ J. Tinbergen aan Ehrenfest, 25 augustus 1931; Jan Tinbergen aan Ehrenfest, 26 september 1931, APE ESC 10, sectie 1; Ehrenfest aan J. Tinbergen, 27 september 1931, Tinbergenarchief UB-EUR, Ordner 2 (1931-1934).

Ten tijde van Ehrenfests aantreden als hoogleraar in 1913 bestonden er vier universiteiten met een natuurwetenschappelijke faculteit: Utrecht, Groningen, Leiden, en de gemeentelijke universiteit van Amsterdam. Te Leiden was het Lorentz, hoogleraar wiskundige fysica (in de periode 1878-1912), die de theoretische fysica in Nederland op een hoog niveau bracht. Maar, zoals we in het volgende hoofdstuk zullen zien, Lorentz had weinig op met de nieuwste ontwikkelingen binnen de quantumtheorie. Hij doceerde de theorie, maar had moeite die ontwikkelingen te volgen en stond er bovendien niet helemaal achter. Zijn leerlingen werden voor het overgrote deel leraar op de HBS. Na zijn vertrek werd zijn leerstoel opeenvolgend bekleed door Ehrenfest (1912-1933) en diens leerling Kramers (1934-1952). Ehrenfest introduceerde de allernieuwste fysica, en maakte zijn leerlingen tot deskundigen op dit gebied.

Aan de Universiteit van Amsterdam verzorgde de zoon van de Nobelprijswinnaar Van der Waals, J.D. van der Waals jr., het onderwijs in de theoretische fysica (1908-1943). Al in 1919 stakten zijn natuurkundige publicaties, waaronder er niet een was op het gebied van de quantumtheorie. Pas na 1920 zou hij die theorie accepteren. School heeft hij niet gemaakt in de theoretische fysica. Hij gaf moeizaam college uit verouderde tekstboeken, en hij had vrijwel geen eigen promovendi. Ouderejaars studenten hadden al snel door dat men voor de theoretische fysica niet bij Van der Waals jr. moest zijn. Zij togen in de regel naar Leiden voor verdere scholing, zoals de chemicus A.J. Rutgers en de fysici R. Krans en J. de Boer.²³⁰ Zij zorgden vervolgens voor een herleving van de theoretische fysica in Amsterdam. A.J. Rutgers werd in 1931 aangesteld als hoofdassistent bij Michels, als steun en toeverlaat voor theoretische kwesties. Het was Rutgers die van de theoretische fysica in Amsterdam nog wat probeerde te maken: hij organiseerde een colloquium waar moderne onderwerpen aan bod kwamen, en hij bracht Casimir regelmatig naar Amsterdam om gastcolleges te geven over de nieuwste ontwikkelingen in de quantumtheorie.²³¹ De fysicus J. de Boer

²³⁰ Maas, *Atomisme en individualisme* (2001) 202-203; De mathematicus J.D. van der Waerden volgde onderwijs bij Van der Waals jr en vond diens onderricht 'niet goed'. Zie: Dold-Samplonius, 'Interview with Bartel Leendert van der Waerden' (1997) 313-320, m.n. 316.

²³¹ Maas, *Atomisme en individualisme* (2001) 204; Overbeek, 'Levensbericht A.J. Rutgers' (2000) 55-60, m.n. 56.

zou het stokje van Van der Waals jr. overnemen (1946-1981). Hij blies de Amsterdamse theoretische fysica weer nieuw leven in.²³²

In Utrecht nam W.H. Julius van 1896 tot 1925 de experimentele natuurkunde voor zijn rekening. De leerstoel theoretische fysica werd bekleed door P.J.W. Debye (1912-1913). De getalenteerde Debye vertrok echter al na een jaar naar Duitsland. L.S. Ornstein (1915-1925) bezette daarop de leerstoel gedurende tien jaar, maar hield zich in die tijd vrijwel alleen bezig met aan de statistische mechanica gerelateerde onderwerpen. Toen Ornstein in 1925 overstapte naar de experimentele fysica, kreeg de Utrechtse theoretische fysica met Kramers (1926-1934) en Uhlenbeck (1935-1939) eindelijk een modern en kwalitatief hoogstaand karakter.²³³

In Groningen was Ornstein (1909-1914) enige jaren lector mathematische fysica. F. Zernike (1914-1958) volgde hem in die functie op. Hij werd in 1920 als hoogleraar theoretische natuurkunde benoemd. Ornstein introduceerde de moderne mathematisch-fysische aanpak in Groningen, maar specialiseerde zich in de klassieke thermodynamica.²³⁴ Zijn opvolger Zernike had weinig op met de quantumtheorie. Hij richtte zich evenals Ornstein steeds meer op het experimentele werk. Hij ontving de Nobelprijs in de fysica in 1953 vanwege zijn fasecontrastmicroscop, een doorbraak op het gebied van de klassieke fysica.²³⁵ De quantummechanica deed haar intrede in Groningen pas toen de Duits-Amerikaanse fysicus Ralph de Laer Kronig in 1930 conservator werd op het lab van Coster, en van 1931 tot 1939 lector in de mechanica en quantummechanica werd.²³⁶

Aan de Vrije Universiteit van Amsterdam ontstond pas in 1930 een natuurwetenschappelijke faculteit. G.J. Sizoo werd er de enige hoogleraar natuurkunde (1930-1965). Sizoo had in Leiden natuurkunde gestudeerd en was in 1926 gepromoveerd bij W.J. de Haas. Hij had college gevolgd bij Ehrenfest, maar was geen theoreticus. In het jaar 1932-1933 trok hij de bij Ehrenfest gepromoveerde R.L. Krans aan als assistent theoretische fysica. Krans verzorgde samen met Sizoo het college golfmechanica. Krans doceerde gedurende een jaar op de VU,

²³² Maas, *Atomisme en individualisme* (2001) 202, 234-235.

²³³ Heijmans, *Wetenschap tussen universiteit en industrie* (1994) 12-13, 38, 46, 50; Maas, *Atomisme en individualisme* (2001) 112.

²³⁴ Heijmans, *Wetenschap tussen universiteit en industrie* (1994) 42.

²³⁵ Baneke, *Synthetisch denken* (2008) 161.

²³⁶ M&R 1.2, 690.

maar wendde zich daarna tot het onderwijs op de middelbare school. Sizoo nam het jaar daarop alle colleges weer voor zijn rekening.²³⁷

Vanaf 1938 verzorgde één van de lectoren wiskunde, J. Haantjes, tevens de theoretisch fysische vakken. Haantjes was te Leiden assistent van Ehrenfest geweest.²³⁸ De eerste twee VU-promovendi in de theoretische natuurkunde werden in 1938 afgeleverd, maar zij werden in de praktijk vooral begeleid door Kramers en Uhlenbeck.²³⁹ In 1946 werd de bij Kramers gepromoveerde C.C. Jonker aangesteld. Hij kreeg als conservator van het natuurkundig laboratorium een deel van het onderwijs in de theoretische natuurkunde toebedeeld. Na het vertrek van Haantjes werd Jonker lector en in 1951 hoogleraar. In 1976 ging hij met emeritaat.²⁴⁰

Ook aan de *Technische Hoogeschool* te Delft introduceerden Ehrenfests leerlingen de moderne natuurkunde. Burgers was er van 1918 tot 1955 hoogleraar aero- en hydrodynamica, Kramers werkte er van 1931 tot 1952, en Kronig was er van 1939 tot 1969 hoogleraar theoretische fysica.²⁴¹

Uit het bovenstaande kunnen we twee conclusies trekken. In de eerste plaats was Leiden rond 1912 de enige Nederlandse universiteit waar op een internationaal niveau theoretische fysica werd bedreven. In Groningen, Utrecht en Amsterdam werd nauwelijks onderzoek van betekenis verricht op het gebied van de moderne fysica. Als er al degelijk onderzoek plaatsvond, dan gold dat doorgaans de traditionele thermodynamica. De nieuwste ontwikkelingen gingen aan de Nederlandse theoretici voorbij – de Leidse fysici uitgezonderd.

In de tweede plaats valt de positie op die Ehrenfest inneemt in de omvorming van de Nederlandse theoretische fysica in een moderne wetenschap die met het internationale onderzoek kon meekomen. Het onderwijs vormde het voornaamste onderdeel van Ehrenfests hoogleraarschap en wellicht ook van zijn leven. Het was zeker geen bijzaak zoals dat bij andere Leidse hoogleraren wel het geval leek te zijn. Zijn levenswerk wierp vruchten af; het is dankzij zijn inzet dat zijn studenten, en de studenten van zijn studenten, verantwoordelijk waren

²³⁷ Flipse, *Hier leert de natuur ons zelf den weg* (2005) 66-67.

²³⁸ Flipse, *Hier leert de natuur ons zelf den weg* (2005) 81.

²³⁹ Flipse, *Hier leert de natuur ons zelf den weg* (2005) 87.

²⁴⁰ Flipse, *Hier leert de natuur ons zelf den weg* (2005) 140.

²⁴¹ M&R 1.2, 690.

voor het nieuwe en belangwekkende theoretisch onderzoek dat tussen 1912 en 1940 in Nederland plaatsvond. De leeszaal, het colloquium, de onderzoeksgerichtheid, en Ehrenfests losse omgangsvormen waren on-Nederlandse verschijnselen. Ehrenfests persoonlijke *touch*, zijn onnavolgbare helderheid, zijn sterke band met en ijver voor zijn studenten, gecombineerd met zijn persoonlijke eigenaardigheden maakten Ehrenfest voor zijn leerlingen tot een welhaast mythologische figuur. Hij leverde zeker belangwekkende bijdragen aan de natuurkunde, zoals we in het volgende hoofdstuk zullen zien, maar zijn belangrijkste resultaten boekte hij door zijn onderwijs.

Hoofdstuk 3

Veranderende fysica

*Wel bedankt voor Uw vriendelijken brief van vanmiddag.
Maar ik heb die evenmin begrepen als de quantentheorie.*

Lorentz aan Ehrenfest¹

Ook al was Ehrenfests rol als leermeester wellicht van groter belang dan die van onderzoeker, dat betekent allerm minst dat zijn onderzoek onbetekenend of middelmatig was. Zijn voortdurende neiging tot zelfdepreciatie kan gemakkelijk leiden tot een onderwaardering van zijn onderzoeksresultaten. Het zal in dit hoofdstuk duidelijk worden dat Ehrenfest belangrijke bijdragen leverde aan de voornaamste onderzoeksgebieden in de moderne fysica. Die bijdragen hadden niet alleen de vorm van artikelen, maar moeten voor een belangrijk deel ook worden gezocht in correspondentie en discussie met andere fysici, zoals Bohr en Einstein. Ook op congressen en tijdens colloquia werd Ehrenfests kritische blik hooglijk gewaardeerd. Alvorens nader in te gaan op zijn uiteenlopende onderzoeksbijdragen, is het nuttig om een beeld te schetsen van de ontwikkeling van het vakgebied voorafgaand aan Ehrenfests komst naar Leiden. Daarna zullen diverse onderzoekswerkzaamheden de revue passeren, zoals Ehrenfests werk aan de statistische fysica, de vroege quantumtheorie, de speciale relativiteitstheorie, en de quantumstatistiek. Tot slot zal ik een algemene karakterisering en waardering geven van Ehrenfests bijdragen aan de fysica.

¹ 22 februari 1926, APE ESC 7, sectie 8.

Natuurkunde rond 1900²

Het is een veelgehoord cliché: de fysica zou rond 1900 door het merendeel van de fysici gezien zijn als een min of meer voltooid bouwwerk. Alle grote ontdekkingen zouden zijn gedaan. Lijnrecht tegenover deze opvatting staan historici die opperen dat rond 1890 juist een crisisstemming heerste onder toenmalige fysici. De grondslagen van het vakgebied waren veelvuldig onderwerp van debat. Recentelijk heeft onder anderen Suman Seth de stelling verdedigd dat er geen sprake was van een crisis. Feitelijke argumenten geeft hij daar niet voor, los van de constatering dat de grondslagendiscussies onder fysici gewoon onderdeel waren van de dagelijkse praktijk van de theoretische fysica in het *fin de siècle*.³ Wellicht ligt de waarheid, zoals gewoonlijk, ergens in het midden, zoals Joseph Rouse oppert; volgens hem coëxisteren episodes van 'normal science' en 'crisis' vaak gedurende lange tijd.⁴ Iets vergelijkbaars suggereert Seth overigens zelf ook, zij het voor de periode rond 1925.⁵ Dat de fysica rond 1890 drastisch begon te veranderen staat hoe dan ook buiten kijf.

Onderdeel van de toenmalige natuurkundige praktijk of niet, feit blijft dat fysici rond 1890 zich rekenschap dienden te geven van een aantal fundamentele ontwikkelingen. Maxwells veldentheorie van het elektromagnetisme gold na haar recente doorbraak nog niet als een voltooid geheel, maar werd gezien als een opwindend nieuw gebied voor onderzoek. De kinetische gastheorie, een ander deelgebied dat nog volop in ontwikkeling was, kampte met ernstige problemen van zowel empirische als theoretische aard. Die laatste problemen golden vooral de pogingen de theorie om te bouwen tot een 'statische mechanica' teneinde een moleculaire onderbouwing te leveren voor de succesvolle thermodynamica.

Daarnaast werden fysici in het laatste decennium van de eeuw geconfronteerd met een hele reeks nieuwe en moeilijke te duiden

² Voor de beschrijving van de natuurkunde van 1890-1912 is veelvuldig gebruik gemaakt van Kragh, *Quantum generations* (1999).

³ Seth, 'Crisis and the construction of modern theoretical physics' (2007).

⁴ Rouse, *Knowledge and power* (1990) 34-35.

⁵ Seth houdt een overtuigend betoog dat er rond de opkomst van de quantummechanica rond 1925 op verschillende plaatsen een 'crisis' werd ervaren die moest worden opgelost, en dat er op andere plaatsen (zoals in München) geen spoor van een crisis te vinden was.

ontdekkingen. Nadat Hertz het bestaan van elektromagnetische straling voor het eerst had aangetoond, ontdekte Röntgen de naar hem genoemde straling en Becquerel niet veel later de raadselachtige radioactiviteit. Dit laatste fenomeen dat gepaard bleek te gaan met verschillende soorten straling, leek zich aan alle bekende natuurwetten te onttrekken. In 1896 ontdekte Pieter Zeeman te Leiden de opsplitsing van spectraallijnen in aanwezigheid van een sterk magnetisch veld. Lorentz slaagde erin om Zeemans resultaten te verklaren aan de hand van zijn nieuwe elektronentheorie, een verfijning van Maxwells theorie. Kort daarop 'ontdekte' J.J. Thomson Lorentz' elektron in zijn onderzoek naar kathodestraling. Ook worstelden fysici met het probleem van de samenstelling van de door een zogenaamd 'zwart lichaam'⁶ uitgezonden elektromagnetische straling. Zowel langs experimentele als theoretische weg probeerden zij inzicht te krijgen in de spectrale verdeling van de uitgezonden energie.

Kortom, de natuurkunde was rond 1900 volop in beweging. Er leefde een ongewoon sterke interesse voor de grondslagen van de fysische theorieën. In wezen ging het om twee fundamentele vragen. De eerste vraag was die naar de ultieme bouwstenen van de wereld. Was alles opgebouwd uit atomen, energievormen, of wellicht elektrische ladingen, of waren al deze dingen niets anders dan lokale toestanden in de ongreepbare ether? De tweede, hiermee samenhangende vraag betrof de fundamentele principes die het gedrag van deze ultieme substanties bepalen? Zijn dat de mechanicawetten, de energetische wetten, of de elektromagnetische wetten?

Volgens zogenaamde energeticisten als de chemicus Wilhelm Ostwald bestond de wereld niet uit materiële deeltjes, maar uit verschillende verschijningsvormen van energie en kon zelfs de mechanica worden gereduceerd tot de wetten die het gedrag van deze energievormen bepaalden. De fysicus Ludwig Boltzmann daarentegen zocht juist een verklaring voor waarneembare fysische processen in het bestaan van atomen die onderworpen waren aan de wetten van de mechanica. Op beide zienswijzen bestond nogal wat kritiek, maar het

⁶ Een 'zwart lichaam' is door Kirchhoff gedefinieerd als een lichaam dat alle invallende straling absorbeert, daar waar vrijwel alle bestaande objecten een deel van die straling weerkaatsen. Kirchhoff liet zien dat de spectrale verdeling van de uitgezonden energie van een dergelijk lichaam een universele functie is van de temperatuur van het lichaam en de frequentie van de straling, onafhankelijk van de chemische samenstelling van het lichaam.

atoom had voor fysici uiteindelijk teveel voordelen om het zomaar aan de kant te zetten. Dat betekende echter niet dat het atoom als een niet verder reduceerbare bouwsteen van de werkelijkheid werd gezien en iets soortgelijks gold voor de wetten van de mechanica.

Vanaf de eeuwwisseling groeide het geloof dat het elektromagnetisme als onderbouwing kon dienen voor de mechanica en zelfs voor de gehele fysica. Het elektromagnetische wereldbeeld, zoals in 1900 werd uitgedragen door zijn exponent Wilhelm Wien, vond zijn oorsprong in Lorentz' elektronentheorie. Materie zou zijn opgebouwd uit massalozes elektrische deeltjes, die echter wel een soort schijnmassa ontleenden aan de wisselwerking met hun eigen elektromagnetische veld.⁷ De elektrische deeltjes zelf werden veelal weer gezien als lokale vervormingen van de ether, die tevens de drager was van de elektrische velden. Dit beloftevolle programma wekte vooral onder Duitse fysici veel enthousiasme op, maar bleek uiteindelijk niet in de verwachte doorbraak te resulteren. Doorbraken kwamen er wel, maar uit een heel andere richting.

In 1900 onderzocht Planck langs theoretische weg de spectrale samenstelling van de door een zwart lichaam uitgestraalde energie en kwam zo tot een resultaat dat goed strookte met de meest recente metingen. Die afleiding vereiste echter wel de merkwaardige aanname dat de energie van hypothetische resonatoren – verantwoordelijk voor de uitzending van de straling – gequantiseerd was in eindige energie-elementjes. Leek het hier aanvankelijk nog te gaan om een artefact van Plancks specifieke benadering, geleidelijk werd duidelijk dat energiequanta tamelijk hardnekkig waren en bovendien slechts een voorbode vormden van een heel nieuw soort fysica.

Een andere opmerkelijke ontwikkeling, waarvan het belang slechts zeer geleidelijk doordrong, voltrok zich door toedoen van Einstein. In 1905 liet Einstein zien dat de bestaande elektromagnetische theorie tot een vreemde asymmetrie leidde in de beschrijving van ten opzichte van elkaar bewegende magneten en geleiders. Die asymmetrie vertaalde zich niet in de verschijnselen. Dit werd door Einstein als een ernstige tekortkoming van de theorie gezien. Om die tekortkoming op te heffen introduceerde hij twee postulaten. Het relativiteitspostulaat zegt

⁷ Middels zelfinductie verzetten die velden zich tegen de verandering van beweging van de elektrische deeltjes en dat verzet manifesteert zich als een soort van traagheid oftewel (trage) massa.

dat in elk inertiaalstelsel dezelfde natuurwetten gelden. Het lichtpostulaat stelt dat de snelheid van het licht in vacuüm in alle inertiaalstelsels dezelfde constante waarde aanneemt, onafhankelijk van de snelheid van de lichtbron. Resultaat van deze postulaten is dat er geen voorkeursstelsel bestaat waarvan gezegd kan worden dat het in absolute rust verkeert. Volgens Einstein was daarmee de ether, die tot dan toe als grondslag voor een voorkeurstelsel kon dienen, overbodig geworden.

Einstein kwam op basis van zijn postulaten uit op dezelfde transformatieformules die Lorentz had geïntroduceerd voor de overgang naar een stelsel met een andere bewegingstoestand, namelijk de Lorentztransformaties, en hetzelfde gold voor de daaruit volgende Lorentzcontractie. De fysische betekenis van die formules mocht dan in Einsteins theorie volstrekt anders zijn dan in die van Lorentz, door de overeenkomst in de voorspellingen zagen veel fysici geen verschil tussen beide theorieën en sprak men veelal van de Lorentz-Einstein-theorie. Pas na enkele jaren drong geleidelijk het inzicht door dat Einsteins theorie afrekende met traditionele opvattingen over ruimte en tijd.

Ehrenfest studeerde van 1899 tot 1906, ten tijde van de hierboven besproken ontwikkelingen. Het werk dat hij publiceerde in de periode 1903-1912 behandelde een groot deel van de nieuwe natuurkunde. Van zijn hand verschenen in deze periode vijftwintig artikelen, waarvan ruwweg een tiental artikelen op het gebied van de thermodynamica en statistische mechanica – in geen geval een afgerond en volledig begrepen gebied. Een vijftal artikelen behandelde de nieuwe en nog onbegrepen theorie van de spectrale verdeling van de door een zwart lichaam uitgestraalde energie. Een ander vijftal ging over de gloednieuwe relativiteitstheorie. Met zijn artikelen begaf Ehrenfest zich in de frontlinie van het theoretisch fysisch onderzoek. Ook in de jaren daarna bleef hij actief op het gebied van de meest fundamentele en vernieuwende onderwerpen binnen de theoretische fysica.

Opvallend is zijn voorliefde voor de grondslagen van zijn vakgebied. Hij reageerde veelal op de bijdragen van anderen. Op glasheldere wijze liet hij dan zien waar problemen en paradoxen optraden. Hij streefde daarbij naar de meest simpele oplossing. Hij wilde voor zichzelf en anderen onduidelijkheden wegwerken en schiep op deze manier helderheid. Zowel in de statistische fysica, als bij de relativiteitstheorie en de opkomende quantumtheorie leverde hij essentiële bijdragen aan de verheldering en erkenning van deze theorieën. Hieronder zullen Ehrenfests voornaamste bijdragen aan de

relativiteitstheorie, de quantumtheorie, de dimensionaliteit van de ruimte, de quantumstatistiek en tenslotte de quantummechanica worden behandeld.

Relativiteitstheorie

Nadat in 1905 Einsteins speciale relativiteitstheorie het licht zag, was het zoals gezegd niet meteen duidelijk of en in hoeverre deze theorie verschilde van Lorentz' elektronentheorie.⁸ Wat in ieder geval in beide theorieën problematisch was, was de gedeelde aanname dat bewegende elektronen konden deformeren. Ehrenfest liet op eenvoudige wijze zien dat een deformerend elektron – dat de vorm van een ellipsoïde zou aannemen – bij beweging niet stabiel zou kunnen zijn. Begon het elektron maar iets te deformeren, dan zou het nooit meer naar zijn oorspronkelijke vorm kunnen terugkeren. Anderen hadden geopperd dat er externe krachten voor nodig waren om een gedefformeerd elektron in een uniforme translatie te houden.⁹ Ehrenfest ging in een volgend artikel uit van een elektron met willekeurige, niet-ellipsoïde vorm, dat in principe wel kon deformeren. Zou een dergelijk elektron met een constante snelheid kunnen bewegen zonder dat daar externe krachten voor nodig waren? Was dat niet het geval, dan zou een andere hypothese in de relativiteitstheorie moeten worden geïntroduceerd, omdat anders het deformerend elektron een instrument kon leveren voor het bepalen van een absoluut ruststelsel. Was dat wel het geval, dan zou dat zonder extra aannamen uit Einsteins theorie af te leiden zijn.¹⁰

Einstein reageerde onmiddellijk op Ehrenfests artikel. Hij merkte onder andere op dat volgens de relativiteitstheorie voor de bepaling van de beweging van het elektron een theorie van de relativistische dynamica

⁸ De volgende paragraaf leunt zwaar op Klein, *Paul Ehrenfest* (1970), en op: Miller, *Albert Einstein's special theory of relativity* (1981). Zie voor Ehrenfests rol in het onderzoek naar elektronen, de relativiteitstheorie en relativistische deformatieverschijnselen: Staley, *Einstein's generation* (2008) 260-293.

⁹ Abraham, 'Prinzipien der Dynamik des Elektrons' (1903) 105-179.

¹⁰ P. Ehrenfest, 'Zur Stabilitätsfrage bei den Bucherer-Langevin-Elektronen', *Physikalische Zeitschrift* 7 (1906) 302-303; *CSP*, 117-118; P. Ehrenfest, 'Die Translation deformierbarer Elektronen und der Flächensatz', *Annalen der Physik* 23 (1907) 204 -205; *CSP*, 144 -145.

van starre lichamen vereist was.¹¹ De relativiteitstheorie bleek dezelfde bewegingsvergelijking voor het bewegende elektron op te leveren als Lorentz' theorie van het deformerende elektron, alleen wist Einstein dit voor elkaar te krijgen zonder aanvullende hypothese over de bouw of het gedrag van het elektron.¹²

Born ontwikkelde in 1909 een theorie voor relativistische starre lichamen, waarbij ieder volume-element van een star lichaam ongedeformeerd bleef in haar eigen ruststelsel. Datzelfde jaar publiceerde Ehrenfest een artikel, waarin hij liet zien dat de theorie een opzienbarende paradox opleverde.¹³ Ehrenfest beschouwde een cilinder met een eenparige rotatie om zijn as. Ieder element op de rand van een draaiende cilinder bezit een momentane snelheid loodrecht op de straal van de cilinder en zou dus contraheren. De totale omtrek van de cilinder neemt af. In radiale richting is er geen beweging, en er is dan ook geen Lorentzcontractie van cilinderelementen langs de straal van de cilinder. De straal zal dus niet afnemen. Dat was echter in tegenspraak met de vaste verhouding tussen cirkelomtrek en straal. Deze opmerkelijke paradox werd al snel de 'Ehrenfestparadox' genoemd.¹⁴

F. Noether rekende uit dat er inderdaad een Ehrenfestparadox bestond, maar had daar tien pagina's rekenwerk voor nodig.¹⁵ Ehrenfests kraakheldere artikel was maar één pagina lang en bevatte vrijwel geen wiskunde. Hij legde hiermee enkele problemen in de relativiteitstheorie bloot, en lokte diverse reacties uit. Die varieerden van mogelijke oplossingen van de paradox, tot afwijzingen van de gehele relativiteitstheorie.¹⁶ Heersend onbegrip rond Einsteins theorie werd

¹¹ A. Einstein, 'Bemerkungen zu der Notiz von Hrn. Paul Ehrenfest: „Die Translation deformierbarer Elektronen und der Flächensatz“', *Annalen der Physik* 23 (1907) 206-208; EP 2, 410-412.

¹² Einstein, *Mijn theorie* (1997) 45.

¹³ P. Ehrenfest, 'Gleichförmige Rotation starrer Körper und Relativitätstheorie', *Physikalische Zeitschrift* 10 (1909) 918; CSP, 154. Zie hierover tevens: Hollestelle, *Honderd jaar Ehrenfestparadox* (2009).

¹⁴ Vrijwel tegelijkertijd zagen Born en Einstein in dat een roterend star lichaam voor problemen zorgde: Born, 'Über die Definition des starren Körpers' (1910) 233-234; A. Einstein aan A. Sommerfeld, 29 september 1909. In: Eckert en Märker, *Arnold Sommerfeld: Wissenschaftliche Briefwechsel Band 1: 1892-1918* (2000) 362-363.

¹⁵ Noether, 'Zur Kinematik des Starren Körpers in der Relativtheorie' (1910) 919-944.

¹⁶ Born, 'Über die Definition starren Körpers' (1910) 233-234, Planck, 'Gleichförmige Rotation und Lorentz-Kontraktion' (1910) 294, Abraham, 'Die

aldus aan het licht gebracht. Volgens een aantal fysici en wiskundigen zou Ehrenfests paradox slechts onderstrepen dat metingen aan bewegende lichamen in Einsteins theorie slechts 'schijnbare waarden' opleverden, veroorzaakt door de manier van klokkenregulering en lengtemeting in Einsteins theorie.¹⁷ De Lorentzcontractie was volgens hen een subjectief, haast psychologisch fenomeen.

Ehrenfest reageerde met een aantal artikelen op Einsteins critici. Ook Einstein zelf mengde zich in de discussie.¹⁸ Dit luidde het begin in van de acceptatie van de relativiteitstheorie als een wezenlijke innovatie; na de toelichting van Ehrenfest en Einstein werd Einsteins theorie eindelijk gezien als fundamenteel verschillend van die van Lorentz. Dat dit onderscheid werd gemaakt was in grote mate te danken aan Ehrenfests scherpzinnige bijdragen.¹⁹ De Ehrenfestparadox werd overigens door Einstein zelf als hoogst problematisch gezien. De realisatie dat een waarnemer op de schijf de waargenomen effecten kan toeschrijven aan de schijnbare aanwezigheid van een gravitatieveld, zette Einstein op het spoor van de algemene relativiteitstheorie. De Ehrenfestparadox vormde zo een cruciale 'missing link' in Einsteins ontwikkeling van de algemene relativiteitstheorie.²⁰

Quantumtheorie

Ehrenfest liep wederom vooraan toen in 1911 de quantumtheorie in de schijnwerpers kwam te staan. Vanaf 1905 was hij een van de zeer weinigen die actief werkten aan de hypothese van het quantum. De quantumhypothese was in 1900 min of meer per ongeluk geïntroduceerd door Max Planck. Planck hoopte een diepere verklaring te vinden voor

Bewegungsgleichungen eines Massenteilchens in der Relativtheorie' (1910) 527-531.

¹⁷ Zie bijvoorbeeld: Lewis en Tolman, 'The principle of relativity, and non-newtonian mechanics' (1909) 510-523; Von Ignatowsky, 'Der starre Körper und das Relativitätsprinzip' (1910) 607-630; Varičak, 'Zum Ehrenfestschen Paradoxon' (1911) 169-170. Ook fysici als Van der Waals jr waren deze mening toegedaan.

¹⁸ Er treden wel degelijk spanningen op in de cylinder en het betreft dus geen psychologisch fenomeen.

¹⁹ Miller, *Albert Einstein's special theory of relativity* (1981) 253.

²⁰ Stachel, 'The rigidly rotating disk as the "missing link" in the history of general relativity' (1989) 48-62.

een eerder door hem voorgestelde uitdrukking voor de spectrale verdeling van een zwarte straler. Hij introduceerde daartoe de 'resonator', een eenvoudig model voor de emissie en absorptie van straling door materie. Planck beschouwde een zeer groot aantal trillende resonatoren in een afgesloten isotherme ruimte in thermisch evenwicht met elektromagnetische straling. Planck zocht vervolgens de meest waarschijnlijke verdeling van de energie over de resonatoren om aldus een uitdrukking te vinden voor de entropie van het systeem. Hij verdeelde daartoe de totale energie in een aantal energie-elementjes. Uit de entropie-uitdrukking volgde de gemiddelde energie van de resonatoren als functie van de frequentie en temperatuur en die hing weer op een eenvoudige manier samen met de energiedichtheid van de straling. Deze aanpak leverde de gezochte uitdrukking, maar alleen met de aanname dat de energie-elementjes een eindige grootte bezaten, evenredig aan de frequentie van de resonatoren en dus van de bijbehorende straling.

Aan dit resultaat hechtte hij in eerste instantie geen enkel belang. Zijn aandacht ging vooral uit naar twee nieuwe natuurconstanten die in het eindresultaat opdoken, tegenwoordig bekend als de constante van Boltzmann en de constante van Planck.²¹ Experimentele fysici bevestigden Plancks distributiewet, maar bekommerden zich niet om de achterliggende theorie. In de periode 1900-1910 werkten er al met al maar een zestal fysici serieus aan het probleem: Planck, Lorentz, Einstein, Ehrenfest, Jeans en Larmor.²² Lorentz was in 1901 de eerste na Planck die erover publiceerde. In 1903 toonde Lorentz aan dat de theorie van Planck bij grote golflengtes compatibel was met zijn eigen elektronentheorie, al waren de fundamentele aannames van beide theorieën verschillend. Lorentz merkte op dat de introductie van eindige energiehoeveelheden een essentieel onderdeel van de theorie van Planck leek te zijn.²³

²¹ Kuhn, *Black-body Theory and the Quantum Discontinuity* (1978) ; Van Lunteren, *Geschiedenis van de moderne natuurkunde*, 158-164.

²² Kragh, *Quantum generations* (1999) 65.

²³ Lorentz, 'The Theory of Radiation and the Second Law of Thermodynamics' (1901) 436-450; Lorentz, 'Boltzmann's and Wien's laws of radiation' (1901) 607-620; Lorentz, 'On the Emission and Absorption by Metals of Rays of Heat of Great Wave-Lengths' (1903), in: Lorentz, *Collected Papers III* (1936) 155-176; Zie ook: Klein, *Paul Ehrenfest* (1970) 230-232.

Lorentz gaf college over stralingstheorie, net toen Paul Ehrenfest in de lente van 1903 zijn bezoek bracht aan Leiden. Ehrenfest las het werk van Planck en Lorentz, maar begon pas zelf aan het probleem te werken nadat hij zijn dissertatie had afgerond. In de periode 1905-1906 schreef hij een tweetal artikelen over Plancks stralingstheorie.²⁴ Een van Ehrenfests conclusies was dat Plancks methode onvermijdelijk leidde naar de door Planck gevonden spectraalverdeling.²⁵ Voor Plancks methode moest een extra aanname worden gekozen, en Ehrenfest liet zien dat deze werd gevormd door Plancks *ad hoc* keuze voor quantisatie van energie.

In 1911 liet Ehrenfest zien dat de quantisatie-aanname van Planck niet alleen een mogelijkheid, maar ook een noodzakelijkheid was voor de afleiding van zijn uitdrukking voor de spectraaldistributie van de straling van een zwart lichaam.²⁶ De quantumhypothese was aldus veel fundamenteeler dan gedacht en zeker niet alleen maar een wiskundige truc. Ehrenfests artikel van 1911 werd slechts in kleine kring gewaardeerd. Het artikel verscheen in oktober, nog voor het eerste Solvaycongres. Dit congres werd vanaf 1911 iedere drie jaar georganiseerd op initiatief van de rijke Belgische uitvinder en industrieel Ernest Solvay (1838-1922). Ehrenfest was voor dit Solvaycongres niet uitgenodigd, enkel de natuurkundige elite was aanwezig. Juist op het eerste Solvaycongres onder voorzitterschap van Lorentz kwam de quantumproblematiek uitgebreid ter sprake. Na het Solvaycongres te hebben bijgewoond, toonde Henri Poincaré in december onafhankelijk van Ehrenfest de noodzakelijkheid aan van energiequantisatie. Poincaré was een autoriteit in de theoretische fysica en overtuigde met zijn artikel veel fysici van het fundamentele karakter van de energiequanta.²⁷

²⁴ P. Ehrenfest, 'Über die physikalischen Voraussetzungen der Planck'schen Theorie der irreversiblen Strahlungsvorgänge', *Sitzungsberichten Kaiserliche Akademie der Wissenschaften Wien, mathematisch-naturwissenschaftliche Klasse* 114 (1905) 1301-1314; Herdrukt in: *CSP*, 88-101; P. Ehrenfest, 'Zur Planckschen Strahlungstheorie', *Physikalische Zeitschrift* 7 (1906) 528-532; Herdrukt in: *CSP*, 120-124; Zie hiervoor: Klein, *Paul Ehrenfest* (1970) 230-234.

²⁵ Navarro en Pérez, 'Paul Ehrenfest on the Necessity of Quanta' (2004) 97-141, m.n. 107. Zie ook: Kuhn, *Black-body Theory and the Quantum Discontinuity* (1978) 152-169.

²⁶ P. Ehrenfest, 'Welche Züge der Lichtquantenhypothese spielen in der Theorie der Wärmestrahlung eine wesentliche Rolle?', *Annalen der Physik* 36 (1911) 91-118; Jammer, *The Conceptual Development of Quantum Mechanics* (1966) 51-52.

²⁷ Klein, *Paul Ehrenfest* (1970) 252-253.

Daarvoor bestonden overigens ook al andere aanwijzingen. Einstein had al in 1907 de quantumhypothese succesvol toegepast op een ander gebied dan de stralingstheorie, namelijk op het terrein van het thermisch gedrag van vaste stoffen. Hij nam aan dat ook de trillingsenergie van de deeltjes in een vaste stof slechts sprongsgewijs kon veranderen en leidde op grond van die aanname een nieuwe uitdrukking af voor de soortelijke warmte van vaste stoffen. Walther Nernst volgde in 1910 met een experimentele toetsing van Einsteins uitdrukking. Hij was een van de voornaamste organisatoren van het eerste Solvay-congres. In 1912 generaliseerde Debye Einsteins theorie waardoor die beter aansloot bij de meetresultaten. Geleidelijk aan raakte het quantum ingeburgerd.²⁸

Dat Poincaré's artikel een grotere impact had dan dat van Ehrenfest kwam niet alleen door Poincaré's grotere bekendheid en hogere status. Ehrenfests artikel was voor zijn tijdgenoten ook moeilijk te begrijpen. Zijn analyse van de stralingstheorie berustte op de enigszins esoterische statistische methoden van zijn leermeester Boltzmann en die waren voor veel fysici niet echt toegankelijk.²⁹

Over het werk van de beroemde Boltzmann bestond in 1911 nog steeds grote verwarring. Zijn omvangrijk oeuvre was verre van inzichtelijk, laat staan dat het een afgerond geheel vormde. Boltzmann volgde in de loop van zijn carrière veel verschillende redeneringen. Een idee werd in later werk vaak weer verlaten, om jaren later plots weer op te duiken. Zo hanteerde hij vier verschillende betekenissen van het begrip 'waarschijnlijkheid'. Ook was niet duidelijk op welke basis kon worden gekozen voor een bepaald ensemble, of de daarvoor karakteristieke waarschijnlijkheidsdistributie.

Ehrenfest trok met zijn verhelderende bijdragen aan Boltzmanns werk de aandacht.³⁰ Felix Klein nodigde hem uit om in Göttingen een lezing te houden op het colloquium. Ehrenfests lezing maakte indruk, en hij werd prompt door Klein gevraagd om een overzicht te schrijven van

²⁸ In 1910-1911 nam het aantal bijdragen aan de quantumtheorie toe, onder andere door: P. Debye (1910), A.E. Haas (1910), F. Hasenöhl (1911), A. Schidlof, P. Weiss, H.A. Wilson. Zie: M&R 1.1, 128.

²⁹ Navarro en Pérez, 'Paul Ehrenfest on the Necessity of Quanta' (2004) 97-141, m.n. 137.

³⁰ P. en T. Ehrenfest, 'Über eine Aufgabe aus der Wahrscheinlichkeitsrechnung, die mit der kinetischen Deutung der Entropievermehrung zusammenhängt', *Mathematisch-Naturwissenschaftliche Blätter* 3 (1906), herdrukt in: CSP, 128-130. Zie hierover: Klein, *Paul Ehrenfest* (1970) 114-119.

de statistische fysica voor de *Encyklopädie der mathematischen Wissenschaften* waarvan Klein redacteur was. Klein had hiervoor eerder Boltzmann gevraagd, maar die had in 1906 zelfmoord gepleegd.³¹ Ehrenfest zou drie jaar aan het artikel werken, dat in 1911 zou verschijnen.³² Zijn vrouw werd medeauteur. Haar werk bestond voor het grootste gedeelte uit het voeren van discussies met haar man om zo verschillende zaken helder te krijgen.³³ Het artikel van de Ehrenfests zou een groot aantal onduidelijkheden in Boltzmanns statistische mechanica blootleggen en van een gedeeltelijke oplossing voorzien. Het resultaat was een coherent en inzichtelijk beeld van Boltzmanns werk.³⁴ Voor velen kreeg het zelfs de status van het definitieve werk in de statistische mechanica.³⁵ Ook nu blijft het een hoogst actueel artikel dat nog steeds herdrukt wordt.³⁶

Ehrenfest vestigde hiermee zijn naam als dé expert op het gebied van de statistische mechanica. Zijn expertise op dit gebied zou een belangrijke rol spelen bij de nieuwe quantumstatistiek en de uitwerking van zijn eigen adiabatische hypothese. Dit laatste beschouwde hij als zijn belangrijkste bijdrage aan de theoretische fysica. Het was een van de eerste ideeën die hij uitwerkte toen hij naar Nederland kwam.

Nogmaals de relativiteitstheorie

In zijn oratie aan de Leidse universiteit sprak Ehrenfest niet over de quantumtheorie, maar over de theorieën van Lorentz en Einstein. Zoals hiervoor is opgemerkt werden de verschillen tussen de theorieën van Einstein en Lorentz nog maar net erkend, en Einstein was inmiddels

³¹ Klein, *Paul Ehrenfest* (1970) 80-83.

³² P. en T. Ehrenfest, 'Begriffliche Grundlagen der statistischen Auffassung in der Mechanik', *Encyklopädie der mathematischen Wissenschaften* IV (Leipzig 1911); herdrukt in: *CSP*, 213-300.

³³ T. Ehrenfest, 'Note', in: *CSP*, 301-302.

³⁴ Klein, *Paul Ehrenfest* (1970) 119-140; Uffink, 'Rereading Ludwig Boltzmann' (2005) 537-555. Volgens Uffink vormde de zogenaamde 'ergodische hypothese' volgens de Ehrenfests de verbindende schakel in het werk van Boltzmann. Dit zorgde voor een helder beeld, maar Uffink toont aan dat het belang van de ergodische hypothese door Boltzmann zelf niet als dusdanig werd erkend.

³⁵ Brush, *Statistical Physics and the Atomic Theory of Matter* (1983) 96.

³⁶ Wetenschapsfilosoof Jos Uffink over het beroemde encyclopedie-artikel van Paul en Tatiana Ehrenfest uit 1912; Uffink, 'Nought but Molecules in Motion' (1996) 373-387.

hard bezig om de theorie uit te breiden van inertiaalstelsels naar stelsels met versnelde bewegingen.

Het pleit was echter nog niet helemaal beslecht. Planck, Lorentz en Poincaré bleven kritisch ten opzichte van de speciale relativiteitstheorie. Ehrenfests vriend Walter Ritz had in de jaren 1908-1909 als alternatief voor de relativiteitstheorie een emissietheorie van het licht ontwikkeld. Hij verving daartoe de ether en Maxwells elektromagnetische velden door fictieve deeltjes die met de lichtsnelheid werden uitgezonden door elektrische ladingdragers. Deze theorie stemde overeen met het relativiteitsprincipe, maar leverde geen moeilijk voorstelbare nieuwigheden op als snelheidsafhankelijke massa, relatieve gelijktijdigheid, en een nieuwe optelwet voor snelheden. De onafhankelijkheid van de lichtsnelheid van de bewegingstoestand van de lichtbron, Einsteins tweede postulaat, werd door Ritz verworpen. Ritz stierf echter in 1909. Ehrenfest schreef in 1912 een samenvattend artikel over de moeilijkheden die volgens Ritz optraden in de relativiteitstheorie.³⁷

In dat jaar werden emissietheorieën als die van Ritz gezien als serieus alternatief voor Einsteins theorie. Ritz navolgend ontwikkelden Comstock en Tolman in de jaren 1910-1913 verschillende alternatieve emissietheorieën. Er ontstond een roep om een experimentele toetsing. Einstein maakte zich behoorlijk druk over de rivaliserende emissietheorie, zoals kan worden opgemaakt uit verscheidene brieven die tussen Ehrenfest en Einstein over en weer gingen. Onderwerp was het vinden van een methode om voor eens en voor altijd duidelijk te kunnen laten zien welke theorie de juiste was.³⁸ Ook tussen Tolman en Ehrenfest werd gecorrespondeerd over een voorstel van Tolman voor een mogelijk cruciaal experiment. Ehrenfest, specialist in zowel de theorie van Ritz als die van Einstein, fungeerde hierin als kritisch klankbord voor Tolmans ideeën.³⁹ Een uitvoerbaar experiment werd door hen nog niet gevonden.

In zijn oratie stelde Ehrenfest dat, wanneer men de snelheid van licht afkomstig van een rustende lichtbron A en een bewegende lichtbron

³⁷ P. Ehrenfest, 'Zur Frage nach der Entbehrlichkeit des Lichtäthers', *Physikalische Zeitschrift* 13 (1912) 317-319.

³⁸ A. Einstein aan P. Ehrenfest, 25 april 1912, 2 mei 1912, ~16 mei 1912. In: EP 5, doc. nrs. 384, 390, 394.

³⁹ Tolman aan Ehrenfest, 15 augustus 1911, 11 november 1911, ESC 10, sectie 1; Ehrenfest aan Tolman, zonder datum (1911), ESC 10, sectie 2; Tolman aan Ehrenfest, 24 januari 1912, ESC 10, sectie 2.

B vergeleek, de theorie van Einstein en Lorentz voorspelde dat in beide situaties de gemeten lichtsnelheid gelijk was. Ritz' theorie echter voorspelde een verschil in snelheid overeenkomend met het snelheidsverschil tussen A en B. Deze beslissende meting was echter nog nooit uitgevoerd, zo zei Ehrenfest, 'weil es eine Messgenauigkeit erfordert, die wir mit unseren gegenwärtigen Hilfsmitteln weitaus noch nicht erreichen können.'⁴⁰

Het is mogelijk dat Ehrenfest hierover nog met de Leidse hoogleraar sterrenkunde Willem de Sitter heeft gesproken; in ieder geval kwam De Sitter door Ehrenfests oratie op het idee om een beslissend experiment uit te voeren.⁴¹ Hij mat de snelheid van het licht afkomstig van een ster die om een andere ster heen draaide en daarbij het ene moment van de aarde af en het andere moment er naartoe bewoog. De gemeten lichtsnelheid bleek in beide gevallen identiek. Ritz' theorie was daarmee weerlegd. Einstein kon opgelucht ademen.⁴² Het resultaat van De Sitter wordt sindsdien als een belangrijk bewijs tegen emissietheorieën aangehaald.⁴³

In de jaren die volgden vormde Ehrenfest samen met Lorentz een welkom klankbord voor Einsteins ideeën over de in ontwikkeling zijnde algemene relativiteitstheorie. Einstein publiceerde in 1913 een eerste versie van zijn gegeneraliseerde theorie.⁴⁴ Mede dankzij de vragen en opmerkingen van Lorentz en Ehrenfest kwam Einstein in 1915 tot de formulering van zijn uiteindelijke theorie.⁴⁵ Gedurende de periode 1915-1920 was Leiden een centrum voor onderzoek naar algemene relativiteit. Johannes Droste werkte gedeeltelijk samen met zijn leermeester Lorentz. Adriaan Fokker droeg bij aan zowel de speciale als de algemene relativiteitstheorie. In Zürich werkte hij in 1913 als assistent samen met

⁴⁰ P. Ehrenfest, *Zur Krise der Lichtaether-Hypothese*, Oratie (Leiden 1912) 18.

⁴¹ De Sitter, 'A proof of the constancy of the velocity of light' (1913) 1297-1298; De Sitter, 'On the constancy of the velocity of light' (1913) 395-396; De Sitter, 'Ein astronomischer Beweis für die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit' (1913) 429; De Sitter, 'Über die Genauigkeit' (1913) 1267.

⁴² Einstein aan Ehrenfest, 28 mei 1913. In: EP 5, doc. nr. 441.

⁴³ Zie bijvoorbeeld: Fox, 'Evidence against emission theories' (1965) 1-17; Panofsky en Phillips, *Classical Electricity and Magnetism* (1962) 272-285.

⁴⁴ A. Einstein en M. Grossman, 'Entwurf einer verallgemeinerten Relativitätstheorie und einer Theorie der Gravitation', *Zeitschrift für Mathematik und Physik* 62 (1913) 225-259; EP 4, 303-339.

⁴⁵ Kox, 'Hendrik Antoon Lorentz, the Ether, and the General Theory of Relativity' (1988) 67-78; Illy, 'Einstein teaches Lorentz, Lorentz teaches Einstein' (1989) 247-289.

Einstein en gezamenlijk publiceerden ze in 1914 een artikel over de algemene relativiteit. Ook Ehrenfests studenten Kramers, Tresling en Struik (ook een student van Schouten, een Leidse mathematicus die ook baanbrekend werk aan de algemene theorie verrichtte) schreven enkele artikelen.

In 1916 kwam de Finse fysicus Gunnar Nordström naar Leiden.⁴⁶ Tijdens de jaren dat hij in Leiden verbleef, woonde hij eerst bij Ehrenfest in huis, om later in een huis aan de overkant van de straat te gaan wonen. Nordström leverde in zijn Leidse jaren belangrijke bijdragen aan de verdere uitwerking van de algemene relativiteitstheorie, waarbij hij profiteerde van Ehrenfests kritiek en diens goede contacten met Einstein. In 1918 keerde Nordström terug naar Finland met zijn vrouw, de natuurkundige Cornelia van Leeuwen, en werd hoogleraar aan de universiteit van Helsinki. Niet lang daarna daalde het aandeel van Leidse wetenschappers in het werk aan de relativiteitstheorie. Lorentz en Fokker hadden geen hechte groep studenten om zich heen. Ehrenfest was de enige die werkelijk school maakte, maar hij zette zijn studenten niet aan tot systematisch onderzoek aan de relativiteit.⁴⁷ Zijn werk en dat van zijn studenten betrof vanaf 1913 voornamelijk de quantumtheorie. Alleen in 1913 verscheen een kort artikel van Ehrenfest over de pogingen een algemene relativiteitstheorie te formuleren.

Vanaf 1912 correspondeerde Ehrenfest wel veelvuldig met Einstein over diens werk. Ehrenfest fungeerde daarbij als sparringpartner en als contactpersoon. Einstein stuurde Ehrenfest steeds de drukproeven van zijn artikelen. Ook vroeg hij of Ehrenfest deze kon doorsturen naar Max Abraham, een andere expert in de relativiteitstheorie, en verzocht hij ze tevens te laten zien aan Lorentz, De Sitter en Nordström.⁴⁸ Ehrenfest leverde kritiek, stelde vragen en drong erop aan dat Einstein zijn argumenten helderder formuleerde. Einstein deed zijn best om Ehrenfests vragen te beantwoorden. Daarbij kwam hij tot een aanscherping en verbetering van zijn theorie.⁴⁹

⁴⁶ Zie o.a. hierover: Halpern, 'Nordström, Ehrenfest, and the role of dimensionality in physics' (2004) 390-400.

⁴⁷ Kox, 'General Relativity in the Netherlands, 1915-1920' (1992) 39-56.

⁴⁸ EP 5, doc. nr. 384, 387, EP 8A, doc. nr. 112, 218, 269, 298.

⁴⁹ Einstein aan Ehrenfest, 25 april 1912, in: EP 5, 384; Einstein aan Ehrenfest, 26 april 1912, in: EP 5, 387; Ehrenfest aan Einstein, 14 mei 1912, in: EP 5, 393; Ehrenfest aan Einstein, ~16 mei 1912, in: EP 5, 394; Ehrenfest aan Einstein, 29 juni 1912, in: EP 5, 411; Einstein aan Ehrenfest, ~7 november 1913, in: EP 5, 481.

‘Ich sende Dir auch eine unkorrigierte Korrektur meiner zusammenfassenden arbeit über die Gravitation; schreib mir gelegentlich eine offene Kritik über diese Darstellung des gegenstandes! Ich wollte eine verständliche Einführung schreiben, weiss aber nicht, ob dies gelungen ist.’⁵⁰

Na het verwerken van Ehrenfests kritiek antwoordde Einstein:

‘Lieber Ehrenfest! Heute endlich sollst Du mit mir zufrieden sein. Ich freue mich sehr über das grosse Interesse, das Du der Sache widmest. ... Du wirst nun wohl keine Schwierigkeit mehr finden.’⁵¹

Ook bezochten ze elkaar om over Einsteins onderzoek te discussiëren, zoals in de zomer van 1913, toen Ehrenfest en Nordström naar Zürich togen.⁵² Einstein broedde sindsdien op een tegenbezoek: ‘Ich habe immer Lust, einmal bei Euch aufzutauchen.’⁵³ In de herfst van 1916 kwam Einstein daadwerkelijk naar Leiden.⁵⁴ Daar wisselde hij van gedachten over zijn werk met Ehrenfest en de Leidse hoogleraar astronomie Willem de Sitter. De Sitter had de speciale relativiteitstheorie van Lorentz geleerd. Hij keek met veel belangstelling naar de algemene relativiteitstheorie, vanwege De Sitters interesse in de consequenties van deze theorie voor de astronomie. Datzelfde jaar publiceerde De Sitter twee artikelen over de theorie in de *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*.⁵⁵ Zo raakten de Britse fysici en astronomen, die midden in de Eerste Wereldoorlog afgesneden waren van de Duitstalige vakliteratuur, bekend met de algemene relativiteitstheorie.

⁵⁰ Einstein aan Ehrenfest, 29 april 1916, in: EP 8A, 218; Einstein aan Ehrenfest, 17 januari 1916, in: EP 8A, 182.

⁵¹ Einstein aan Ehrenfest, ~24 januari 1916, in: EP 8A, 185.

⁵² Einstein aan Ehrenfest, tweede helft van november 1913, in: EP 5, 484.

⁵³ Einstein aan Ehrenfest, 25 augustus 1916, in: EP 8A, 253.

⁵⁴ Einstein aan Ehrenfest, 24 oktober 1916, in: EP 8A, 269; Einstein aan Ehrenfest, 7 november 1916, in: EP 8A, 275.

⁵⁵ De Sitter, ‘On Einstein’s theory of gravitation and its astronomical consequences. First paper’ (1916) 699-728; De Sitter, ‘On Einstein’s theory of gravitation and its astronomical consequences. Second paper’ (1916) 155-183.

Maar ondertussen werkte De Sitter ook aan kritische besprekingen van Einsteins werk.⁵⁶ In een artikel postuleerde Einstein een sferische, driedimensionale ruimte met een tijdsonafhankelijke kromming. Volgens Einstein kon dit heelal niet bestaan zonder materie.⁵⁷ Vervolgens liet De Sitter zien dat er wel degelijk een oplossing bestond voor een heelal dat geen massa bevat – het beroemd geworden *De Sitter Heelal*.⁵⁸ In het betreffende artikel, dat in maart 1917 verscheen, maakte De Sitter gebruik van een sferisch vierdimensionaal universum dat een paar maanden eerder tijdens een gesprek was gesuggereerd door Ehrenfest.⁵⁹ Ehrenfest had hier in 1912 al aan gewerkt.⁶⁰

Dimensionaliteit

Ehrenfests onderzoek aan de vierdimensionale ruimtetijd was een uiting van Ehrenfests grote voorliefde voor het ‘spelen’ met dimensies. George Uhlenbeck merkte eens op dat Ehrenfest een idee altijd meteen in n dimensies wilde uitwerken.⁶¹ Deze eigenaardigheid deelde Ehrenfest met zijn vrouw. In 1915 schreef Tatiana een stuk over het dimensiebegrip in de fysische vergelijkingen.⁶² In 1922 schreef ze zelfs aan Einstein dat de vijfde dimensie de oplossing kon vormen voor alle quantumproblemen.⁶³ Maar al eerder hielden fysici en wiskundigen zich bezig met het dimensiebegrip. De niet-euclidische meetkunde deed in 1900 zijn intrede in de fysica onder meer in het werk van de astronoom Karl

⁵⁶ Zoals: De Sitter, ‘On the relativity of rotation in Einstein’s theory’ (1916) 527-532.

⁵⁷ Pais, *Subtle is the Lord* (2005) 281-288; A. Einstein, ‘Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie’, *Sitzungsberichte Königlich Preussische Akademie der Wissenschaften Berlin* (1917) 142-152; EP 6, 541-551.

⁵⁸ De Sitter, ‘On the relativity of inertia’ (1917) 1217-1225; De Sitter, ‘On the curvature of space’ (1917) 229-242.

⁵⁹ De Sitter, ‘On the relativity of inertia’ (1917) 1217-1225, m.n. 1220.

⁶⁰ P. Ehrenfest aan W. de Sitter, 18 april 1917, Sterrewachtarchief Leiden, archief Willem de Sitter,

inv.no. 15. Zie: Kerszberg, *The invented universe* (1989) 142-143.

⁶¹ Halpern, ‘Nordström, Ehrenfest, and the Role of Dimensionality in Physics’ (2004) 390-400, m.n. 397.

⁶² T. Ehrenfest, ‘Der Dimensionsbegriff’ (1916) 259-276. (15 maart 1915 geschreven)

⁶³ Zie: Einstein aan Ehrenfest, 12 februari 1922, geciteerd in: Halpern, ‘Nordström, Ehrenfest, and the Role of Dimensionality in Physics’, 397.

Schwarzschild. Aan het eind van de voorafgaande eeuw bestond er een kleine groep van fysici die nogal speculatieve theorieën ontwikkelden, en onder andere hyperdimensionale theorieën van de ether construeerden.⁶⁴ Poincaré en L.E.J. Brouwer probeerden begin twintigste eeuw op grond van mathematische overwegingen aan te tonen dat de ruimte driedimensionaal moest zijn.⁶⁵ Ehrenfests belangstelling kwam pas goed van de grond in 1916, toen Nordström naar Leiden kwam. Nordström had in 1914 als eerste voorgesteld een vijfdimensionale ruimte te gebruiken voor de unificatie van elektromagnetisme met een scalair zwaartekrachtsveld. Einstein zag het werk van Nordström als een serieus alternatief voor zijn eigen pogingen een zwaartekrachtstheorie te formuleren. Even later liet Einstein samen met Fokker zien dat Nordströms scalaire gravitatie-theorie beter begrepen kon worden binnen de context van een gekromde ruimtetijd.⁶⁶ De vooruitgang die hiermee werd geboekt deed Einstein het pad inslaan dat uiteindelijk leidde tot zijn algemene relativiteitstheorie.

Niet lang hierna gaf Nordström het werk aan zijn eigen theorie op en zou hij uitgroeien tot een gerespecteerde expert in de algemene relativiteitstheorie. Nordström en Ehrenfest spraken vaak uitgebreid over het generaliseren van de elektrodynamische vergelijkingen naar een n -dimensionale ruimte, en de verbinding tussen elektrische lading en gravitationele massa in een zwaartekrachtstheorie. Ook de Maxwelltheorie in vier dimensies en hoger kwam aan de orde. Ze poogden om langs deze weg een unificerende theorie van de zwaartekracht en het elektromagnetisme te ontwikkelen.⁶⁷

De wereld om ons heen heeft er alle schijn van driedimensionaal te zijn. Vandaar dat Ehrenfest in 1917 een artikel publiceerde over de vraag of en hoe er in de fundamentele natuurwetten te zien is dat de ruimte drie dimensies heeft: 'In what way does it become manifest in the

⁶⁴ Kragh, *Quantum generations* (1999) 6-7.

⁶⁵ Brouwer, 'Ueber den natürlichen Dimensionsbegriff' (1913) 146-152; Brouwer, 'Beweis der Invarianz der Dimensionenzahl' (1911) 161-165; Poincaré, 'L'espace et ses trois dimensions' (1903) 281-301, 407-429; Poincaré, 'Pourquoi l'espace a trois dimensions' (1912) 483-504. Zie: Jammer, *Concepts of Space* (1970) 182-184.

⁶⁶ A. Einstein en A.D. Fokker, 'Die Nordströmsche Gravitationstheorie vom Standpunkt des absoluten Differenzialkalküls', *Annalen der Physik* 44 (1914) 321-328; EP 4, 589-596.

⁶⁷ Halpern, 'Nordström, Ehrenfest, and the role of dimensionality in physics' (2004) 390-400, m.n. 394-395.

fundamental laws of physics that space has three dimensions?’⁶⁸ Niemand minder dan Immanuel Kant had ooit een vermoeden uitgesproken dat de driedimensionaliteit van de ruimte een noodzakelijk uitvloeisel zou kunnen zijn van Newtons omgekeerde kwadratenwet voor de zwaartekracht. Het was echter Ehrenfest die als eerste liet zien dat dit inderdaad het geval leek te zijn. Hij kwam tot de conclusie dat alleen in drie dimensies stabiele planetaire banen mogelijk waren.⁶⁹ Met andere woorden, voor een ruimte met meer of minder dan drie dimensies, of voor een ruimtetijd met meer of minder dan vier dimensies, kunnen planeten geen gesloten banen volgen.

Voor de spectraallijnen van het Bohr-atoom kwam Ehrenfest tot een soortgelijke conclusie. Een eindige hoeveelheid energieniveaus kan alleen bestaan als het elektron in een driedimensionale ruimte om de kern beweegt. Zou de ruimte niet driedimensionaal zijn, dan zou bovendien een golfvergelijking dispersie met zich meebrengen, waardoor golven niet in pulsen of groepen kunnen reizen, zodat de overdracht van energie of informatie onmogelijk zou worden. Een ander voorbeeld is dat voor ieder ander dimensiegetal ongelijk aan drie er een asymmetrie optreedt tussen de aantallen vrijheidsgraden die translatie en rotatie definiëren, iets dat verregaande gevolgen zou hebben voor de dynamica. Ook het aantal componenten dat het elektrische, respectievelijk het magnetische veld bepaalt, is alleen maar in drie dimensies aan elkaar gelijk en slechts dan bestaat er een dualiteit tussen de beide velden. Hij publiceerde zijn bevindingen in de *Proceedings* van de KAW, maar in 1920 ook in de meer gelezen *Annalen der Physik*.⁷⁰

Ehrenfest zag zich genoopt tot deze laatste herpublicatie door het werk van Hermann Weyl. Deze liet zien dat alleen in een wereld bestaande uit drie ruimtelijke en een tijdsdimensie de Maxwelltheorie is af te leiden uit een zogenaamde actie-invariant.⁷¹ In de versie die in 1920

⁶⁸ P. Ehrenfest, ‘In what way does it become manifest in the fundamental laws of physics that space has three dimensions?’, *Proceedings AA 20* (1917) 200-209; zie: *CSP* 38.

⁶⁹ De fysico-theoloog W. Paley gebruikte dit argument al, zie: Paley, *Natural Theology* (1802).

⁷⁰ P. Ehrenfest, ‘In what way does it become manifest in the fundamental laws of physics that space has three dimensions?’, *Proceedings AA 20* (1917) 200-209; P. Ehrenfest, ‘Welche Rolle spielt die Dreidimensionalität des Raumes in den Grundgesetzen der Physik?’, *Annalen der Physik* 61 (1920) 440-446; zie: *ECP* 38.

⁷¹ Weyl, ‘Gravitation und Elektrizität’ (1918) 465-480; ‘Neue Erweiterung der Relativtheorie’ (1919) 101-133.

in de *Annalen* verscheen, schreef hij als concluderende opmerking dat het ook instructief zou zijn om te onderzoeken wat er in n dimensies zou gebeuren met de wet van Stefan-Boltzmann, de verschuivingswet van Wien en de verhouding tussen de specifieke warmtes van eenatomige gassen.

Ehrenfests publicatie werd aanvankelijk nauwelijks opgemerkt. Toch is het een klassiek artikel geworden; iedereen die na hem over de dimensionaliteit van de ruimte schreef, haakte aan bij zijn argumenten.⁷² Het bleef ook niet bij deze ene publicatie. Ehrenfest publiceerde in 1924 samen met Henry Bateman een artikel waarin elektromagnetische golven werden afgeleid uit een elementaire golfvergelijking.⁷³ Ehrenfest vroeg of Uhlenbeck hem wilde helpen de concepten van dit artikel te generaliseren naar n dimensies.⁷⁴

Een jaar na het verschijnen van Ehrenfests artikel over de driedimensionaliteit in de *Annalen der Physik* verscheen er een beroemd geworden artikel van Theodor Kaluza. Hierin probeerde Kaluza eveneens een unificatie in de natuurkunde tot stand te brengen. Door de introductie van een vijfde dimensie kon hij zijn vijfdimensionale veldentheorie uiteenrafelen in de bekende Einsteinvergelijkingen voor het zwaartekrachtsveld, en de Maxwellvergelijkingen voor de elektrodynamica. De quantumtheorie wist hij echter niet in zijn theorie onder te brengen.⁷⁵ Oskar Klein, een student van Bohr, poogde in 1926 de nieuwe resultaten van De Broglie en Schrödinger te verbinden met de resultaten van Kaluza. In april kwam hij tot een golfvergelijking in vijf ruimtelijke dimensies. Zijn doel was om het quantumgedrag van atomaire deeltjes te verklaren door periodiek gedrag in de vijfde dimensie.⁷⁶

Ehrenfest hoorde van Oskar Kleins werk aan vijf dimensies, en nodigde hem uit om in juni 1926 naar Leiden te komen. Ehrenfest en

⁷² Jammer, *Concepts of Space* (1970) 205–207; Callender, ‘Answers in search of a question’ (2005) 113–136.

⁷³ H. Bateman en P. Ehrenfest, ‘The derivation of electromagnetic fields from a basic wave-function’, *Proceedings NAS* 10 (1924) 369–374; *CSP* 55, 507–512.

⁷⁴ P. Ehrenfest en G. E. Uhlenbeck, ‘On the connection of different methods of solution of the wave equation in multi-dimensional spaces’, *Proceedings AA* 29 (1926) 1280–1285; *CSP* 58, 526–531.

⁷⁵ Kaluza, ‘Zum Unitätsproblem der Physik’ (1921) 966–972. Voor Kaluza en Klein, zie: *M&R* 5.2, 810–813.

⁷⁶ Klein, ‘Quantentheorie und fünfdimensionale Relativitätstheorie’ (1926) 895–906.

Uhlenbeck spraken die hele zomer vrijwel elke dag met Klein over zijn werk.⁷⁷ Ehrenfest moet Klein gewezen hebben op de problematische grondslagen van een theorie in vijf dimensies. In zijn artikel uit 1917 had hij immers laten zien dat alles er op wees dat de ruimtelijke component van de wereld waarin wij leven driedimensionaal moest zijn. In augustus dat jaar stuurden Ehrenfest en Uhlenbeck een artikel in over Kleins theorie; deze bleek te voldoen aan de bekende relatie voor de relativistische impuls, en aan de vergelijking voor samenhang tussen groepsnelheid en fasesnelheid. De bekende quantumregel voor een elektron dat in een cirkel beweegt, kon uit de theorie worden gevonden, waarbij de constante van Planck samenhang met de periode van het bewegende elektron in de vijfde dimensie.⁷⁸ Dit betekende in feite dat quantumeffecten pas op quantumschaal optraden, en niet in de macroscopische wereld.

Blijkbaar zag Klein zich gestimuleerd door Ehrenfests belangstelling. Pas na het artikel van Ehrenfest leidde Klein begin september 1926 expliciet de extreem kleine lengte af van de met h samenhangende periode, en stelde hij dat de oorsprong van het quantum gelegen was in de periodiciteit in de vijfde dimensie. De kleine waarde van h verklaarde volgens hem waarom de effecten van de vijfde dimensie zich alleen op quantumniveau voordoen.⁷⁹ In december 1926 liet Klein⁸⁰ met behulp van het correspondentieprincipe zien dat een ‘gewone’ vierdimensionale relativistische golfvergelijking was af te leiden uit de eerder gepubliceerde vijfdimensionale theorie. Klein bedankte in het artikel onder anderen Ehrenfest voor zijn bijdrage aan hun discussies over de golfmechanica.

⁷⁷ Halpern, ‘Nordström, Ehrenfest, and the role of dimensionality in physics’ (2004) 390-400, m.n. 397.

⁷⁸ P. Ehrenfest en G. E. Uhlenbeck, ‘Graphische Veranschaulichung der De Broglieschen Phasenwellen in den fünfdimensionalen Welt von O. Klein’, *Zeitschrift für Physik* 39 (1926) 495-498.

⁷⁹ Klein, ‘The atomicity of electricity as a quantum theory law’ (1926) 516.

⁸⁰ Klein, ‘Elektrodynamik und Wellenmechanik’ (1927) 407-442. Zie ook: M&R 5.2, 810-813.

Ontstaan van de oude quantumtheorie

Toen Klein naar Leiden kwam was de basis voor de problematische quantumtheorie inmiddels behoorlijk verbreed. De belangrijkste stap na Plancks 'ontdekking' van de energiequanta was een suggestie van Niels Bohr, die in 1912 in Manchester kwam werken bij Ernest Rutherford. Rutherford was na experimenten van zijn medewerkers tot de conclusie gekomen dat atomen uit een kleine, positief geladen kern bestonden, waarin zich vrijwel de gehele massa van het atoom bevond, omringd door een bolvormige, negatieve ladingsverdeling in de vorm van elektronen. Echter, dit model kon niet stabiel zijn volgens de geldende wetten en het bood, anders dan het model van J.J. Thomson, geen verklaring voor de chemische eigenschappen van een atoom. Hetzelfde gold voor de spectrale patronen en de dispersie. Rutherfords model werd door andere fysici dan ook nauwelijks besproken.

Bohr ontwikkelde zijn eigen atoommodel door uit te gaan van dat van Rutherford en vervolgens beperkingen op te leggen aan de toegestane elektronenbanen. Hiervoor maakte hij gebruik van een quantumhypothese. In Bohrs model cirkelen elektronen rond een kern in een beperkt aantal toegestane banen – de stationaire toestanden –, die door middel van de klassieke mechanica kunnen worden beschreven. De grootte van de cirkelvormige baan wordt vastgelegd door een quantumgetal. Ondanks hun periodieke beweging rond de kern zenden de elektronen geen straling uit in de stationaire toestanden, hetgeen een breuk impliceert met de klassieke stralingstheorie. Uitzending en absorptie van straling vinden alleen plaats bij de sprongsgewijze overgang tussen twee stationaire toestanden. De frequentie van de straling hangt niet samen met die van de baanbeweging van het elektron, maar met het energieverval tussen de twee toestanden. Dat energieverval is namelijk gelijk aan $h\nu$, de constante van Planck maal de frequentie van de uitgezonden of geabsorbeerde straling.

Hoewel de theorie een zeer speculatief karakter had, en volledig in strijd was met de klassieke stralingstheorie, was ze buitengewoon succesvol. Bohrs theorie verklaarde de spectra van waterstof en geïoniseerd helium. Niet alleen de empirische spectra, maar ook de daarmee samenhangende Rydbergconstante kon door Bohrs model worden verklaard. Bohr wist deze bekende spectroscopische constante uit te drukken in andere, fundamentele natuurconstanten zoals de constante van Planck en de lading en massa van het elektron.

Na kleine correcties voor het meebewegen van de kern en voor relativistische effecten kon het Bohrmodel toch niet alle details van het waterstofspectrum verklaren. Het gaf geen verklaring voor de fijnstructuur van de spectraallijnen, noch voor het Zeemaneffect (1896) en het Starkeffect (1913). Bij het Zeemaneffect deelt een spectraallijn zich op in een aantal spectraallijnen als het atoom zich in een magnetisch veld bevindt. Bij het Starkeffect gebeurt hetzelfde, maar dan in een elektrisch veld.

Bohr vermoedde dat het uiteenvallen van de spectraallijnen in meerdere nabijgelegen lijnen kon worden verklaard door uit te gaan van elliptische in plaats van circulaire banen. Hij liep echter vast in de wiskundig complexe materie. In München werkte de meer wiskundig georiënteerde theoretisch fysicus Arnold Sommerfeld Bohrs idee verder uit. Dit resulteerde in de introductie van een tweede quantumgetal dat de excentriciteit van de elliptische banen vastlegde. Door tevens rekening te houden met relativistische effecten slaagde hij erin rekenschap te geven van de fijnstructuur van het waterstofspectrum.

De introductie van een derde quantumgetal maakte het tevens mogelijk rekenschap te geven van het Zeemaneffect en het Starkeffect. In het geval van de aanwezigheid van een extern veld bleek het mogelijk een kwantisatieregule op te stellen voor de ruimtelijke oriëntatie van de elektronenbaan. Door tevens selectieregels te introduceren voor de toegestane overgangen tussen verschillende quantumtoestanden van het atoom ontstond een goede overeenstemming met de meest recente meetresultaten. Zo slaagde Friedrich Paschen erin een aantal theoretische voorspellingen van het Bohr-Sommerfeld-model experimenteel te verifiëren. Het typeert Sommerfeld dat hij zich geen moment druk maakte over het *ad hoc*-karakter van de quantumregels en selectieregels, waarvan de bestaansreden volstrekt duister bleef.

Ehrenfest realiseerde zich, net als Bohr zelf, dat Bohrs atoommodel geen logisch fundament in de klassieke fysica had. Direct na Bohrs eerste publicatie beklagde Ehrenfest zich tegenover Lorentz over Bohrs onconventionele manier om de waterstofspectra af te leiden: 'Wenn dieser Weg zum Ziel führt muss ich die Beschäftigung mit Physik aufgeben!'⁸¹ Jarenlang toonde hij zich uiterst sceptisch over het werk van Bohr en Sommerfeld. Dat veranderde echter toen hij inzag dat Bohr zelf

⁸¹ Ehrenfest aan Lorentz, 25 augustus 1913, Lorentzarchief, toegangsnr. 364, inv. nr. 20.

de theorie enkel beschouwde als een opstapje naar een dieperliggende en samenhangende theorie. Zijn toenemende waardering voor Bohr werd ongetwijfeld mede ingegeven door het feit dat Bohr het adiabatiscbe principe van Ehrenfest aanpreef als een belangrijk hulpmiddel in die zoektocht.

De adiabatiscbe hypothese

Al in 1911 was het Ehrenfest opgevallen dat de straling van een zwart lichaam een dubbelzinnige relatie onderhield met de klassieke fysica. Waar de afleiding van Plancks stralingswet een fundamentele breuk vereiste met de klassieke theorie, behielden andere langs klassiek-thermodynamiscbe weg afgeleide resultaten onverminderd hun geldigheid. Dat laatste gold bijvoorbeeld voor de zogenaamde verschuivingswet van Wien, volgens welke de golflengte waarbij de meeste energie wordt uitgestraald afneemt bij toenemende temperatuur: $\lambda_{\max} \sim 1/T$. Hij had laten zien dat onder bepaalde aannames die resultaten konden worden afgeleid uit Boltzmans statistiscbe uitdrukking voor de entropie. Daarbij maakte hij gebruik van het gegeven dat E_ν/ν , oftewel het quotiënt van de energie van de straling met frequentie ν en die frequentie zelf, onveranderd bleef bij een oneindig langzame verkleining van de ruimte waarin de straling zich bevond. Hij sprak in dit verband van een ‘adiabatiscbe compressie’. Daarbij kwam hij door analyse van Plancks wet tot het inzicht dat een eventuele quantumconditie enkel deze adiabatiscbe invariante grootbeid kon gelden. Quantisatie van een andere grootbeid zou resulteren in een conflict met de wet van Boltzmann.

Dit laatste gegeven leek een mogelijke ingang tot een dieper inzicht in het hoe en waarom van de raadselachtige quantumcondities. Daarvoor moest hij echter zijn resultaten zien te generaliseren. In december 1912 concludeerde hij dat er bij ieder periodiek systeem sprake was van een *adiabatiscbe invariantie* van het quotiënt van de gemiddelde kinetiscbe energie en de frequentie⁸² Dit resultaat ontleende hij aan een

⁸² Voor ontstaan, ontwikkeling en receptie van de adiabatiscbe hypothese, zie: Leclercq, *De adiabatiscbe hypothese* (2006); Navarro en Pérez, ‘Genesis of the adiabatic hypothesis’ (2006) 209-267; Pérez Canals, *La hipótesis adiabática de Paul Ehrenfest* (2007); Klein, *Paul Ehrenfest*, 264-292; Pais, *Niels Bohr’s Times*, 189-190; Jammer, *The conceptual development of quantum mechanics* (1966) 89-109.

theorema van Boltzmann. De invariantie van de door de frequentie gedeelde energie van Plancks resonatoren is zo gezien een gevolg van het feit dat de totale energie van een dergelijke resonator exact het dubbele is van de gemiddelde kinetische energie.

Hoewel het Ehrenfest aanvankelijk vooral te doen was om de vraag naar de geldigheid van Boltzmanns statistische grondslag van de thermodynamica in het licht van de nieuwe ontwikkelingen, zag hij al spoedig in hoe hij zijn bevindingen productief kon maken. Het was deze ingeving die hij na zijn komst naar Leiden trachtte uit te werken en die in 1913 zou resulteren in twee publicaties.⁸³ De grondgedachte was als volgt. Als van een bepaald systeem de quantumconditie bekend is en dit systeem via een adiabatistische verandering kan worden getransformeerd in een ander systeem, dan volgt uit het bestaan van een adiabatistische invariant onmiddellijk de quantumconditie van het nieuwe systeem. Dit was in wezen de grondslag van wat Einstein later zijn ‘adiabatistische hypothese’ zou noemen: de aanname dat toegestane quantumtoestanden van het oude systeem na adiabatistische transformatie de toegestane quantumtoestanden van een nieuw systeem opleverden.

Ehrenfest paste deze gedachte toe op een systeem van roterende moleculen, om aldus een quantumvoorschrift te vinden voor de rotaties. Hij ging uit van een gequantiseerd systeem van elektrische dipolen die onder invloed van een krachtig elektrisch veld harmonisch vibreren. De analogie met Plancks resonatoren leverde hem hier de quantumconditie. Als de sterkte van het oriënterende veld geleidelijk aan gereduceerd werd tot nul zou de vibratiebeweging uiteindelijk overgaan in een rotatiebeweging. De adiabatistische connectie tussen vibratie en rotatie leverde hem de gezochte kwantisatie van de roterende moleculen. Alleen die rotaties waren toegestaan waarvoor de gemiddelde kinetische energie een geheel veelvoud was van $h\nu/2$. Daaruit kon hij vervolgens de soortelijke warmte van twee-atomige gassen bepalen.⁸⁴

Recente metingen aan de soortelijke warmte van waterstof hadden uitgewezen dat de bijdrage van de rotatie van de moleculen aan die soortelijke warmte wegviel bij zeer lage temperaturen. Einstein en

⁸³ P. Ehrenfest, ‘Bemerkung betreffs der spezifischen Wärme zweiatomiger Gase’, *Verhandlungen der Deutschen physikalischen Gesellschaft* 15 (1913) 451-457; P. Ehrenfest, ‘A mechanical theorem of Boltzmann and its relation to the theory of energy quanta’, *Proceedings AA* 16 (1913) 591-597.

⁸⁴ P. Ehrenfest, ‘Bemerkung betreffs der spezifischen Wärme zweiatomiger Gase’, *Verhandlungen der Deutschen physikalischen Gesellschaft* 15 (1913) 451-457.

Stern toonden in 1913 aan dat de experimentele gegevens goed konden worden benaderd door de aanname dat een roterend twee-atomig gasmolecuul een energie $h\nu/2$ behoudt als de absolute temperatuur naar nul gaat – de zogenaamde ‘nulpuntsenergie’.⁸⁵ Zij suggereerden tevens dat een zelfde soort aanname zou kunnen volstaan voor de afleiding van Plancks stralingswet, zonder de noodzaak van energiequantisatie. Het was vooral deze opmerking die Ehrenfest inspireerde tot een alternatieve theorie over twee-atomige gassen.⁸⁶ Hij meende immers in 1911 die noodzaak van de energiequantisatie voor de afleiding van Plancks stralingswet te hebben aangetoond. Hij liet daarom zien dat quantisatie van de rotatie-energie van de gasmoleculen, gecombineerd met een meer rigoureuze statistische aanpak dan die van Einstein, tot vergelijkbare resultaten leidde zonder de veronderstelling van een nulpuntsenergie. Overigens verwees hij slechts in een korte voetnoot naar het gebruik van de adiabatistische hypothese.⁸⁷ Pas in een daaropvolgend artikel in 1913 ging hij wat uitgebreider in op het ontstaan en de afleiding van de *adiabatenstelling*, waarvan hij de wortels situeerde in het werk van Boltzmann.⁸⁸ Nog datzelfde jaar kwam Einstein tot de conclusie dat de door hem voorgestelde hypothese – de nulpuntsenergie – tot tegenstrijdigheden leidde.

Ehrenfests adiabatistische hypothese werd in eerste instantie lauw onthaald. Voor de meeste fysici waren zijn uitgebreide uiteenzettingen vermoedelijk te technisch, te formeel en te rigoureuus. Positieve reacties kreeg Ehrenfest wel van Einstein, die in 1914 als eerste na Ehrenfest zijn adiabatistische transformaties gebruikte.⁸⁹ Einstein was goed op de hoogte

⁸⁵ A. Einstein en O. Stern, ‘Einige Argumente für die Annahme einer molekularen Agitation beim absoluten Nullpunkt’, *Annalen der Physik* 40 (1913) 551–560. Zie hierover het editorial: ‘Einstein and Stern on Zero-point Energy’, in: EP 4, p. 270–273.

⁸⁶ Navarro en Pérez, ‘Genesis of the adiabatic hypothesis’ (2006), 219.

⁸⁷ Leclercq, *De adiabatistische hypothese* (2006) 26–27; Navarro en Pérez, ‘Genesis of the adiabatic hypothesis’ (2006) 209–267, m.n. 217–237.

⁸⁸ P. Ehrenfest, ‘A mechanical theorem of Boltzmann and its relation to the theory of energy quanta’, *Proceedings AA* 16 (1913) 591–597. Zie hierover: Leclercq, *De adiabatistische hypothese* (2006) 27–33; Navarro en Pérez, ‘Genesis of the adiabatic hypothesis’ (2006) 209–267, m.n. 217–237.

⁸⁹ A. Einstein, ‘Beiträge zur Quantentheorie’, *Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft* 16 (1914) 820–828; M&R 6.1, 439–440.

van de door Ehrenfest ontwikkelde hypothese.⁹⁰ Hij had Ehrenfest zelfs gewezen op een problematische eigenschap van de adiabatiscche transformatie. Geleidelijk aan slaagde Ehrenfest er echter in zijn voornaamste twijfels weg te nemen en groeide Einsteins enthousiasme voor Ehrenfests werk.⁹¹ 'Ihre Idee der adiabatischen Umformungen lässt mich nicht los. Vielleicht ist dies noch das wertvollste Hilfsmittel in der allgemeinen Hoffnungslosigkeit'.⁹²

In 1916 kwam Ehrenfest nog een keer uitgebreid terug op zijn 'adiabatische hypothese'. De aanleiding daartoe vormde Sommerfelds succesvolle generalisatie van het Bohrmodel middels aanvullende quantumcondities. In het voorjaar van 1916 schreef Ehrenfest Sommerfeld een brief waarin hij hem feliciteerde met zijn geslaagde verklaring van de fijnstructuur van de spectraallijnen van het waterstofatoom. Hij voegde daar onmiddellijk aan toe dat hij het vreselijk vond dat hierdoor het 'monsterlijke' model van Bohr een krachtige steun in de rug kreeg.⁹³ Hij wees in zijn brief nadrukkelijk op de samenhang van de door Sommerfeld gevonden quantumregels met de adiabatanstelling. In zijn reactie ging Sommerfeld hier echter nauwelijks op in.⁹⁴

Hierdoor geprikkeld schreef Ehrenfest in 1916 eindelijk een helder en toegankelijk overzichtsartikel, dat hij in drie verschillende tijdschriften publiceerde teneinde zijn hypothese bij zoveel mogelijk collega's onder de aandacht te brengen. Hij liet hierin het verband zien tussen de adiabatiscche hypothese en de quantumcondities van Planck, Debye, Bohr, Sommerfeld en anderen.⁹⁵ Zo liet Ehrenfest zien dat de door Debye beschouwde anharmonische oscillator via een adiabatiscche transformatie kon worden veranderd in een harmonische oscillator, zodat ook hier moest gelden dat het quotiënt van de gemiddelde kinetische energie en de frequentie een geheel veelvoud moest zijn van een $\frac{1}{2}h$. Waar Ehrenfest in het geval van Planck en Debye kon volstaan met de al eerder uitgevoerde analyse van een eendimensionale oscillator, vereiste

⁹⁰ Zie: Einstein aan Ehrenfest, ~ 7 november 1913, ~ 10 april 1914, 25 mei 1914, 8 juli 1914 en Ehrenfest aan Einstein, 21 mei 1914. Zie respectievelijk: EP 5, 481; EP 8A, 2, 11, 19, 10.

⁹¹ Klein, *Paul Ehrenfest* (1970) 272.

⁹² Einstein aan Ehrenfest, ~7 november 1913, in: EP 5, 481.

⁹³ Klein, *Paul Ehrenfest* (1970) 286.

⁹⁴ Klein, *Paul Ehrenfest* (1970) 286.

⁹⁵ P. Ehrenfest, 'On adiabatic changes of a system in connection with the quantum theory', *Proceedings AA* 19 (1916) 576-597.

het Bohr-Sommerfeldmodel een analyse van meerdimensionale systemen. Hiertoe stelde hij de bewegingsvergelijkingen voor een deeltje bewegend onder invloed van een centrale kracht op in poolcoördinaten. Vervolgens liet hij zien dat voor de radiale coördinaat en bijbehorende impuls een adiabatische invariant gevonden kon worden die overeenkwam met een van de twee door Sommerfeld gequantiseerde grootheden. Hetzelfde deed hij voor de hoekcoördinaat, waaruit de tweede kwantisatieregule volgde. Ehrenfest vroeg zich tevens af of de pas gevonden quantumregule van Epstein adiabatische invarianten betroffen. Epstein had met behulp van een geheel andere methode een algemenere set quantumregule afgeleid die ook golden voor niet strikt periodieke systemen.⁹⁶

Weer was Sommerfeld niet onder de indruk van Ehrenfests resultaten. Sommerfelds eigen aanpak resulteerde in correcte voorspellingen, en voor hem hoefden daar geen diepere betekenisvragen aan te worden verbonden. Wat kon Ehrenfests analyse toevoegen aan de al eerder verkregen uitkomsten? De adiabatische hypothese was tevens geen succes omdat ze niet kon worden uitgebreid en toegepast op relativistische modellen van het waterstofatoom, zo deelde Sommerfeld aan Ehrenfest mee.⁹⁷ Sommerfelds laatdunkende reactie op Ehrenfests dierbare geesteskind, zorgde bij Ehrenfest voor een periode van diepe depressie. Mede om zijn depressie te doorbreken stopte hij acht maanden lang met het werken aan de theoretische natuurkunde, en stortte zich op de wiskundige economie – zie hoofdstuk 6 voor deze episode.⁹⁸

Wel stimuleerde Ehrenfest zijn student Jan Burgers om het probleem van het relativistische waterstofatoom en de quantumregule van Epstein te onderzoeken. In een serie van drie artikelen, die de basis vormden voor zijn proefschrift, liet Burgers zien dat de quantumregule van Epstein en Schwarzschild – beide uitbreidingen van de quantumcondities van Sommerfeld – konden worden teruggevoerd op adiabatische invarianten.⁹⁹ Door Burgers werk werd voor eens en voor altijd duidelijk dat de adiabatische hypothese in staat was om coherentie

⁹⁶ Epstein, 'Zur Theorie des Starkeffektes' (1916) 489-520; Epstein, 'Zur Quantentheorie' (1916) 168-188.

⁹⁷ A. Sommerfeld to P. Ehrenfest, November 16, 1916. In: *Arnold Sommerfeld, Wissenschaftlicher Briefwechsel Band I* (2000) doc. nr. 265.

⁹⁸ Klein, *Paul Ehrenfest* (1970) 305.

⁹⁹ Burgers, 'Adiabatische invarianten bij mechanische systemen I' (1917) 849-857; 'Adiabatische invarianten bij mechanische systemen II' (1917) 918-922; 'Adiabatische invarianten bij mechanische systemen III' (1917) 1055-1061.

in de tot dan toe onsamenhangende quantumtheorie te brengen, al wist men nog steeds niet *waarom* een systeem gequantiseerd was.

Hoe cruciaal de samenwerking tussen Ehrenfest en Burgers was, wordt duidelijk uit hun correspondentie.¹⁰⁰ In 1918 vroeg Ehrenfest Burgers om hulp; de wiskundige finesses van een in december 1918 ontvangen artikel van Krutkow over adiabatistische invarianten ontgingen Ehrenfest geheel, al vermoedde hij dat het artikel slordigheden bevatte. In 1923 riep Ehrenfest wederom zijn voormalige student te hulp, ditmaal om zich het bewijs voor een stelling uit nota bene Burgers proefschrift eigen te maken. Ehrenfest nodigde zichzelf voor verdere uitleg uit op Burgers' laboratorium in Delft. Een maand later ontving Burgers echter een smeekbede van Ehrenfest, die beëindigd werd met: 'Hilf!'. Hoewel Ehrenfest de intuïtie en de kritische vaardigheden bezat om een goed idee te herkennen miste hij de noodzakelijke rekenkracht.

Dankzij Burgers wiskundige vaardigheden werd duidelijk dat de adiabatistische hypothese een solide grondslag kon vormen voor de quantisatie van diverse systemen. Einstein zag het adiabatistische principe en Burgers' uitbreiding daarvan als een belangrijke stap voorwaarts in de quantumtheorie. 'Die Abhandlung des Herrn Burgers hat mich sehr gefreut. Die Adiabatenmethode und die Schwarzschild-Epstein'sche Methode stützen sich nun gegenseitig.'¹⁰¹ Einstein merkte op dat het werk van Burgers hoog werd aangeslagen in Berlijn.¹⁰²

Mogelijk nog belangrijker was de steun van Niels Bohr voor Ehrenfests adiabatistische hypothese. Ehrenfests initiële reserves ten aanzien van Bohrs atoommodel verdwenen na hun eerste briefcontact in 1918. Al in 1916 had Sommerfeld Ehrenfest bericht over Bohrs waardering voor zijn adiabatistische principe. Bohr had zojuist een artikel voltooid waarin hij het fundament van zijn theorie probeerde te versterken met behulp van Ehrenfests principe. De verschijning van Sommerfelds artikelen deed hem besluiten de publicatie op te schorten. In 1918 had hij een nieuw artikel gereed. In zijn eerste brief aan Ehrenfest schreef hij hem dankbaar gebruik te hebben gemaakt van zijn principe, en legde hij uit waarom hij in het bijgesloten artikel daarvoor

¹⁰⁰ P. Ehrenfest aan J. Burgers, 13 december 1918; 7 februari 1923; 13 februari 1923; 23 maart 1923; AHQP 75.

¹⁰¹ Einstein aan Ehrenfest, 4 februari 1917, in: EP 8A, 294.

¹⁰² Einstein aan Ehrenfest, 6 december 1918, in: EP 8B, doc. nr. 664.

een andere benaming gebruikte, namelijk 'principe van de mechanische transformeerbaarheid'.¹⁰³

In dit artikel, getiteld *On the quantum theory of line-spectra* probeerde Bohr de quantumtheorie tot een coherente theorie te smeden. Daartoe maakte hij noodgedwongen gebruik van elementen uit de klassieke theorieën en van quantumconcepten, die niet uit die klassieke theorieën waren af te leiden. Het gebruik van de klassieke elementen werd volgens Bohr gerechtvaardigd door Ehrenfests adiabatiese hypothese. Ook de overgang van de ene stationaire toestand naar de ander kon door Bohr worden verklaard door middel van Ehrenfests adiabatiese hypothese.¹⁰⁴ In het artikel zwaaide Bohr Ehrenfest alle lof toe, bijvoorbeeld door te spreken over 'the great progress ... recently obtained by Ehrenfest.'¹⁰⁵ Bohrs inmiddels grote reputatie bezorgde aldus Ehrenfests werk eindelijk algemene bekendheid in de fysische gemeenschap. Vervolgens zouden Bohr, Einstein, Sommerfeld, Smekal, Born, Fock, Von Laue, Fermi, Dirac en Pauli allen de adiabatiese hypothese gebruiken in hun werk.¹⁰⁶ Krutkow en Dirac breidden het wiskundige formalisme van de adiabatiese hypothese uit voor atomaire systemen.¹⁰⁷

Na het ontvangen van Bohrs brief en het lezen van diens artikel stopte Ehrenfest prompt met zijn werk aan de mathematische economie en begon hij weer aan de theoretische fysica te werken.¹⁰⁸ Niet lang hierna eindigde de Eerste Wereldoorlog, en troffen Ehrenfest en Bohr elkaar voor het eerst. Bohr was zeer onder de indruk van Ehrenfest:

'Dear Ehrenfest, you do not know how miserable and stupid I feel when writing this letter. I am sitting and thinking of all what you have told me about so many many different things, and

¹⁰³ Klein, 'Great connections come alive: Bohr, Ehrenfest and Einstein' (1986); N. Bohr aan Ehrenfest, 5 mei 1918, APE ESC 1, sectie 5.

¹⁰⁴ Leclercq, *De adiabatiese hypothese* (2006) 75-85. De basis voor Bohrs artikel was al in 1916 gelegd, dus vóór Burgers' bijdrage. Zie: Pais, *Niels Bohr's Times* (1991) 190.

¹⁰⁵ Geciteerd in: Pais, *Niels Bohr's Times* (1991) 190.

¹⁰⁶ Leclercq, *De adiabatiese hypothese* (2006); Bijvoorbeeld: Fermi, 'Il principio delle adiabatice' (1923) 171-175; Fermi, 'Alcuni teoremi di meccanica' (1923) 271-285.

¹⁰⁷ Leclercq, *De adiabatiese hypothese* (2006) 73-74.

¹⁰⁸ Dit valt op te maken uit de datum van de laatste economische aantekening, zoals aangehaald door Klein, *Paul Ehrenfest* (1970) 305, n.49.

Ehrenfest haald samen met Paul jr Niels Bohr van de trein.

Photograph by Samuel Goudsmit, courtesy AIP Emilio Segre Visual Archives

whatever I think of I feel that I have learned so much from you
which will be of great importance for me [...].'¹⁰⁹

Ehrenfest werd op zijn beurt een echte Bohr-adept. Hij voelde zich vooral aangetrokken tot Bohrs intuïtieve en aanschouwelijke manier van werken.

Bohr ontwikkelde vanaf 1918 tevens zijn eigen leidraad binnen de quantumtheorie, zijn zogenaamde *correspondentieprincipe*, dat in 1920 die naam kreeg. Het correspondentieprincipe legt een verband tussen de quantumtheorie en de klassieke theorie. Volgens het principe bestaat er bijvoorbeeld een één op één correspondentie tussen de harmonische componenten van de klassieke beweging en de mogelijke overgangen tussen stationaire toestanden.¹¹⁰ In handen van de intuïtief werkende

¹⁰⁹ Bohr aan Ehrenfest, 10 mei 1919, APE ESC 1, sectie 5.

¹¹⁰ Alisa Bokulich, 'Three Puzzles about Bohr's Correspondence Principle', voordracht gehouden op 15 juli 2008 op de conferentie *HQ2 – Second International Conference on the History of Quantum Physics*, Utrecht. Het

Bohr was het correspondentieprincipe een krachtig instrument om te komen tot nieuwe ideeën in de quantumtheorie. De nadere wiskundige uitwerking liet hij in die dagen veelal over aan zijn wiskundig getalenteerde assistent Kramers.

Toen een overspannen Bohr in 1921 niet naar het Solvay-congres kon komen, drong Lorentz er bij Ehrenfest op aan het rapport van Bohr voor het congres in te sturen.¹¹¹ Bohrs artikel was echter verre van af, en Ehrenfest nam de taak op zich het artikel af te maken en om Bohrs voordracht over te nemen. Bohr was daar maar wat blij mee; Ehrenfest was hierin volgens Bohr veel beter dan hijzelf, en bovendien kon Ehrenfest beter een discussie inleiden en voeren.¹¹² Ehrenfest gebruikte vanaf 1922 het correspondentieprincipe in een aantal artikelen.¹¹³ Via Ehrenfest kwam Bohr in aanraking met Einstein; in de jaren vanaf 1923 tot eind 1925 verliep hun contact alleen maar via andere fysici, vooral via Ehrenfest.¹¹⁴

Ehrenfest bleef bereid Bohr op alle mogelijke manieren bij te staan, zoals bijvoorbeeld in 1931. Bij een bezoek aan Kopenhagen stelde Ehrenfest vast dat Bohr in zijn maag zat met een groot aantal artikelen die maar niet af kwamen. Daardoor werden zijn ideeën onsystematisch gepubliceerd. Ehrenfest stelde Bohr voor om rond de uitreiking van de Lorentzmedaille een lezingencyclus van tien uur te komen geven, waarbij een stenograaf meeschreef. Casimir en Kramers zouden de tekst verder kunnen uitwerken. Bohr moest de gelegenheid worden geboden om rustig, geïsoleerd te werken, samen met bijvoorbeeld Casimir. Daar had Bohr wel oren naar. Ehrenfest wist voor dit plan 1000 gulden te betrekken uit het Lorentzfonds.¹¹⁵ In deze jaren zou Ehrenfest optreden als gewaardeerd criticus en bemiddelaar bij de befaamde discussiebijeenkomsten van Bohr en Einstein; waarover later meer.

correspondentieprincipe behandelt dus niet alleen de statistische overgang van de quantummechanica voor grote quantumgetallen in de klassieke mechanica.

¹¹¹ Lorentz aan Ehrenfest, 17 december 1920, APE ESC 7, sectie 7.

¹¹² Bohr aan Ehrenfest, 23 maart 1921, APE ESC 1, sectie 6.

¹¹³ In 1922 gebruikt hij Bohrs principe onder andere in de artikelen: P. Ehrenfest en G. Breit, 'A remarkable case of quantization', *Proceedings AA* 25 (1922) 2-5; P. Ehrenfest, 'The difference between series spectra of isotopes', *Nature* 109 (1922) 745-746; A. Einstein en P. Ehrenfest, 'Quantentheoretische Bemerkungen zum Experiment von Stern und Gerlach', *Zeitschrift für Physik* 11 (1922) 31-34.

¹¹⁴ Pais, *Niels Bohr's Times* (1991) 237.

¹¹⁵ Ehrenfest aan A.D. Fokker, 26 juni 1931; 3 juli 1931, APE ESC 4, sectie 5.

Sommerfelds afkeuring van de adiabatiese hypothese maakte in 1917 plaats voor waardering toen hij deze hypothese als instrument wist te gebruiken om een probleem in de dispersie van straling door moleculen op te lossen. In 1919 nam Sommerfeld de adiabatiese hypothese op in zijn beroemde boek *Atombau und Spectrallinien*. Sommerfeld verklaarde met behulp van de hypothese het Zeeman-effect. In de derde editie van *Atombau*, die in 1922 verscheen, werd de rol van de adiabatiese hypothese zelfs nog sterker. Sommerfeld paste hierin deze hypothese toe op verschillende aspecten van het Starkeffect.¹¹⁶ Echter, Sommerfeld suggereerde dat de hypothese op het eerste Solvaycongres was ontstaan tijdens een discussie tussen Lorentz en Einstein.¹¹⁷ Ehrenfest raakte zwaar gedeprimeerd over deze ‘geschiedvervalsing’ in Sommerfelds invloedrijke boek. Ehrenfests eigen troetelkind verwerd hiermee tot een soort plagiaat. Ehrenfests daadwerkelijke bijdrage zou alleen maar liggen in de naam die hij ervoor had bedacht.¹¹⁸

In 1923 publiceerde Ehrenfest nog een overzichtsartikel over het ontstaan en het belang van zijn adiabatiese hypothese in de quantumtheorie.¹¹⁹ De Weense fysicus Adolf Smekal schreef in 1925 een artikel in de *Encyklopädie der Mathematischen Wissenschaften* over de quantumtheorie, waarin hij uitgebreid aandacht schonk aan Ehrenfests adiabatiese hypothese. Die quantumtheorie liep echter op haar laatste benen. Datzelfde jaar ontstond de nieuwe quantummechanica, toen Heisenberg, Jordan en Born, voortbouwend op Heisenbergs nieuwe ideeën, de matrixmechanica formuleerden. Schrödinger volgde in 1926 met zijn golfmechanica. De adiabatiese hypothese had geen rol in het ontstaan van deze theorieën.

¹¹⁶ Sommerfeld, *Atombau und Spectrallinien* (1919); Sommerfeld, *Atombau und Spectrallinien* (1922); Zie voor deze episode: Leclercq, *De adiabatiese hypothese* (2006) 92-96.

¹¹⁷ Lorentz wees er tijdens het Solvay-congres van 1911 op dat als de lengte van een gequantiseerde slinger zeer langzaam verandert, er geen sprake kan zijn van de overgang naar een andere quantumtoestand, terwijl de energie van de slinger wel verandert. Einstein wees er vervolgens op dat de energie weliswaar verandert, maar de frequentie ook, en wel zodanig dat het quotient van deze twee grootheden constant blijft. Wat Sommerfeld suggereerde was dat daarmee in feite het idee van adiabatiese constanten is geboren.

¹¹⁸ Ehrenfest aan Bohr, 5 mei 1922, zie hiervoor: Leclercq, *De adiabatiese hypothese* (2006) 92-96.

¹¹⁹ P. Ehrenfest, ‘Adiabatiese Transformationen in der Quantentheorie und ihre Behandlung durch Niels Bohr’, *Naturwissenschaften* 11 (1923) 543-550.

De eerste jaren werd de adiabatiese hypothese nog wel binnen de quantummechanica gebruikt. Schrödinger introduceerde de adiabatiese transformatie in de storingsrekening als middel om de Hamiltoniaan van een verstoord fysisch systeem uit te rekenen – iets wat Bohr in 1918 had voorgesteld.¹²⁰ In deze huidige functie wordt de hypothese overigens nog steeds gebruikt in de quantummechanica. Dirac schreef in 1925 over het gebruik van de adiabatiese hypothese binnen de quantummechanica en een jaar later herinterpreteerde Fermi de adiabatiese invarianten binnen het kader van de nieuwe golfmechanica.¹²¹ Born gebruikte de adiabatiese hypothese om de consistentie aan te tonen van zijn waarschijnlijkheidsinterpretatie van Schrödingers golfmechanica. Hij liet onder meer zien dat in zijn interpretatie de overgangswaarschijnlijkheden tussen quantumtoestanden zich aan de adiabatiese hypothese conformeren. In 1928 liet Born samen met Fock zien dat de nieuwe interpretatie van de hypothese algemeen geldig is in de quantummechanica.¹²² Maar datzelfde jaar deelde Heisenberg zijn student Bloch mee de adiabatiese hypothese binnen de quantummechanica niet meer als vruchtbaar onderzoeksgebied te beschouwen.¹²³ De in de klassieke fysica gewortelde hypothese werd aan de kant geschoven door de nieuwe quantummechanica, en had voor het vinden en rechtvaardigen van nieuwe quantumcondities en -theorieën afgedaan.

Quantumstatistiek

De adiabatiese hypothese was een van de weinige werkelijk originele bijdragen van Ehrenfest aan de quantumtheorie. Grote ontdekkingen heeft Ehrenfest niet meer gedaan. Wel droeg hij op originele en verhelderende wijze bij aan het debat over de quantumtheorie, bijvoorbeeld op het gebied van de statistiek – immers zijn specialisme.

¹²⁰ M&R 5.1, 342-343.

¹²¹ Dirac, 'The adiabatic invariance of quantum integrals' (1925) 725-734; Dirac, 'The adiabatic hypothesis for magnetic fields' (1925) 69-72; Fermi en Persico, 'Il principio delle adiabatiche' (1926) 452-457; Zie voor deze episode: Gallavotti, 'Classical mechanics and the quantum revolution in Fermi's early works' (2004) 75-84.

¹²² Leclercq, *De adiabatiese hypothese* (2006) 97-102; M&R 6.1, 51-52.

¹²³ M&R 6.1, 596.

In 1914 publiceerde hij samen met Kamerlingh Onnes een simpele en inzichtelijke afleiding voor de distributiewet van Planck.¹²⁴ Tegenwoordig wordt dit als standaardafleiding in de moderne natuurkundeleerboeken gepresenteerd – vaak zonder dat daarbij naar Ehrenfest en Kamerlingh Onnes wordt verwezen.¹²⁵ In het artikel kwam Ehrenfest tot een aantal interessante constatering. Einstein behandelde lichtquanta als deeltjes, die van elkaar onderscheiden konden worden en daarom op de klassieke manier als statistisch onafhankelijk konden worden beschouwd, maar kwam door deze aanpak niet uit op de juiste uitdrukking voor de spectrale verdeling van de straling van een zwart lichaam. Planck kwam wel uit op de juiste uitdrukking, maar Ehrenfest liet zien dat de statistische aanpak van Planck de quanta in feite als van elkaar ononderscheidbaar behandelde – een aanpak die weer niet gestoeld was op de klassieke statistische mechanica.¹²⁶ Het was onduidelijk hoe de statistische fysica een plaats kon vinden binnen de quantumtheorie. Einsteins uitkomst was onjuist, en Planck leek zich – zoals Ehrenfest en zijn student Trkal in 1920 lieten zien – te bedienen van een ongeoorloofde statistische aanpak.¹²⁷

De zaak raakte in een stroomversnelling toen in 1925 de Indiase fysicus Bose een artikel opstuurde naar Einstein. Einstein was zo onder de indruk van Bose's resultaat, dat hij het artikel voor hem in het Duits vertaalde en instuurde ter publicatie. Het was Bose wel gelukt om met behulp van Einsteins lichtquanta de stralingsverdeling van Planck af te leiden. Bose had hierbij gebruik gemaakt van een nieuwe soort statistische aanpak. De aanpak was zeker elegant – maar al snel kreeg Einstein van Ehrenfest te horen dat de statistiek van Bose-Einstein de fotonen als statistisch afhankelijk beschouwde. Fotonen hadden hiermee net als bij Plancks oorspronkelijke quantumhypothese hun individualiteit verloren – en dat bleef in strijd met de klassieke statistische fysica.¹²⁸

Einstein liet zich niet zo snel uit het veld slaan. Hij zag in de Bose-statistiek een nieuwe steun voor zijn lichtquantum-hypothese.

¹²⁴ Jammer, *The Conceptual Development of Quantum Mechanics* (1966) 51-52.

¹²⁵ P. Ehrenfest en H. Kamerlingh Onnes, 'Simplified deduction of the formula from the theory of combinations which Planck uses as the basis of his radiation theory', *Proceedings AA* 17 (1914) 870-873. Herdrukt in: *CSP* 353-356.

¹²⁶ Klein, *Paul Ehrenfest* (1970) 255-257.

¹²⁷ P. Ehrenfest en V. Trkal, 'Deduction of the dissociation equilibrium from the theory of quanta and a calculation of the chemical constant based on this', *Proceedings AA* 23 (1920) 162-183; *CSP* 414-435; *M&R* 4, 59.

¹²⁸ *M&R* 6.1, 19.

Bovendien generaliseerde hij de Bose-Einstein-statistiek en paste deze toe op een ideaal gas.¹²⁹ In een tweede artikel pareerde hij de bezwaren van Ehrenfest. Het verlies van individualiteit van identieke deeltjes was een fundamentele eigenschap en kon worden verklaard wanneer de deeltjes werden beschreven in termen van de materiegolven van De Broglie. De bijzondere eigenschappen van de Bose-Einstein-statistiek werden veroorzaakt door onderlinge interferentie van de materiegolven van de gasdeeltjes.¹³⁰ Met deze verklaring wist Einstein tevens de klassieke Gibbsparadox voor het mengen van identieke gassen op te lossen. Tegelijkertijd werd hiermee door Einstein een merkwaardig fenomeen voorspeld. Wanneer een groep deeltjes wordt afgekoeld beneden een (extreem lage) kritische temperatuur zullen ze abrupt in de grondtoestand terechtkomen en zich allemaal als een enkele entiteit gaan gedragen, een verschijnsel dat in latere jaren Bose-Einstein-condensatie zou worden genoemd.

De quantumstatistiek was iets heel anders dan de klassieke statistiek waaraan de natuurkundigen gewend waren. In Göttingen had Born grote moeite om Einsteins radicale werk betreffende het quantumgas te begrijpen. Gelukkig, zo merkte Born op in een brief aan Einstein, kwam Ehrenfest naar Göttingen om de Bose-statistiek uit te leggen.¹³¹ In juni 1925 hielp Ehrenfest Born en consorten de verbinding tussen de materiegolven en de Bose-Einstein-statistiek in Einsteins werk te begrijpen.¹³² Ehrenfest bezocht Göttingen bijna ieder jaar om er voordrachten te houden, en zou in 1929 als docent zelfs invallen voor de zieke Born.¹³³

Uit Ehrenfests bezoek aan Born kwam een artikel voort waarin Ehrenfest zich afvroeg of de combinatie van de klassieke statistische

¹²⁹ A. Einstein, 'Quantentheorie des einatomigen idealen Gases', *Sitzungsberichte des preußischen Akademie der Wissenschaften* (1924) 261-267.

¹³⁰ M&R 1.2, 616-618; A. Einstein, 'Quantentheorie des einatomigen idealen Gases. 2. Abhandlung', *Sitzungsberichte des preußischen Akademie der Wissenschaften* (1925) 3-14.

¹³¹ M. Born aan A. Einstein, 15 juli 1925, in: Born, *The Born-Einstein Letters* (2005) 81.

¹³² M&R 3, 150.

¹³³ Thorndike Greenspan, *The end of a certain world* (2005) 155; M&R 6.2, 760n.

Ehrenfest in zijn rol als ‘discussiebrandpunt’; van links naar rechts: Einstein, Ehrenfest, Langevin, Kamerlingh Onnes, Weiss.
Alfred A. Knopf, courtesy AIP Emilio Segre Visual Archives

onafhankelijkheid van golven met de quantumtheorie leidde tot tegenstrijdigheden, hetgeen inderdaad het geval bleek te zijn.¹³⁴ Ehrenfests idee vormde een belangrijk uitgangspunt voor Pascual Jordan, die in een gezamenlijk artikel met Born en Heisenberg voor het

¹³⁴ P. Ehrenfest, ‘Energieschwankungen im Strahlungsfeld oder Kristallgitter bei Superposition quantisierter Eigenschwingungen’, *Zeitschrift für Physik* 34 (1925) 362-373; *CSP*, 513-524.

eerst een formulering gaf van wat later de quantummechanica ging heten.¹³⁵

Ehrenfest was behoorlijk kritisch over de Bose-Einstein-statistiek. Vooral het door Einstein voorspelde condensatie-effect kon zijn goedkeuring niet wegdragen. In september 1926 ontving Einstein een brief van Ehrenfest, dat een schertsend artikel bevatte dat door Ehrenfest samen met zijn student Uhlenbeck was geschreven: *Führt die Bose-Einstein-Statistik bei idealen Gasen zu einer Entartungs-Condensation?*, gevolgd door een nogal bondige samenvatting van het artikel: 'Nein!' Ehrenfest stelde voor om het op te sturen naar het fictieve *Zeitschrift für miße Physik*.¹³⁶ Ze claimden dat Einsteins condensatie-effect slechts een rudiment was van een ongeoorloofde wiskundige truc, namelijk het op zeker cruciaal ogenblik in de berekening verwisselen van een sommatieformule met een integraal. Om hun argument kracht bij te zetten had Ehrenfest het artikel van een citaat van Schiller voorzien: 'Wenn die Könige baun, haben die Kärner zu thun.'¹³⁷ Met andere woorden: wanneer grote fysici zoals Einstein iets bedenken, moeten de gewone fysici het vuile werk verrichten.

Einstein kon wel lachen om de grap, maar wist de inhoudelijke argumenten minder te waarderen.¹³⁸ Hij liet zien dat er een werkelijk condensatie-effect optrad, zelfs als de somformule tot aan het eind van de berekening bleef staan. Ehrenfest en Uhlenbeck waren het hier niet mee eens, maar publiceerden het artikel niet.¹³⁹ Uhlenbeck zou de kritische analyse wel in zijn dissertatie opnemen. Einsteins condensatiefenomeen bleef in sluimerende toestand, mede – zo claimde Fritz London in een artikel in 1938 – omdat Uhlenbeck de correctheid van Einsteins resultaat ter discussie had gesteld.¹⁴⁰

Ehrenfest en Uhlenbeck gooiden het over een andere boeg. In een artikel dat ze op 15 december 1926 instuurden, onderzochten ze of de golfmechanica alleen de Bose-Einstein- en Fermi-Dirac-statistiek toeliet – wat over het algemeen gedacht werd. Ze lieten voor het geval van een

¹³⁵ M&R 3, 149-156; Born, Heisenberg, Jordan, 'Zur Quantenmechanik II' (1926) 557-615.

¹³⁶ M&R 6.1, 274-276; Uhlenbeck, 'Some Reminiscences about Einstein's visits to Leiden' (1980) 524-525.

¹³⁷ Schiller, 'Kant und seine Ausleger' (1838) 436.

¹³⁸ Einstein aan Ehrenfest en Uhlenbeck, 24 september 1926, in: M&R 6.1, 275.

¹³⁹ M&R 6.1, 275.

¹⁴⁰ M&R 6.2, 871; London, 'The λ -phenomenon of liquid helium' (1938) 643-644.

eendimensionaal ideaal gas zien dat de algemene oplossing van de Schrödingervergelijking voor identieke deeltjes niet dwong tot het opgeven van de statistiek van Boltzmann.¹⁴¹ De klassieke Boltzmannstatistiek hing samen met het toelaten van alle mogelijke oplossingen van de Schrödingervergelijking. Om Bose-Einstein- of Fermi-Dirac-statistiek te krijgen waren er extra aannames nodig, namelijk de selectie van een puur symmetrische of antisymmetrische oplossing – iets dat Dirac in augustus 1926 had aangetoond voor fotonen en elektronen.¹⁴² Daarbij hingen de antisymmetrische oplossingen samen met het Pauliverbod – geen twee elektronen in een atoom kunnen identieke quantumtoestanden bezetten (hierover later meer). Ehrenfest merkte in een voetnoot op dat omdat Diracs antisymmetrische oplossingen ook golden voor moleculen, er een uitgebreid Pauliverbod kon worden aangenomen dat ook gold voor atomen en moleculen, en niet alleen voor elektronen.

In januari 1927 kwam Ehrenfest in zijn brieven aan Einstein terug op zijn kritiek op Einsteins condensatieverschijnsel, maar Einstein hield voet bij stuk. Einstein vroeg zich op zijn beurt af of Diracs statistiek wel juist was. Ehrenfest argumenteerde van wel; Fermi-Dirac-statistiek hing volgens Ehrenfest samen met de ondoordringbaarheid van materiële deeltjes, omdat – zo meende hij – de Schrödingervergelijking onvermijdelijk leidde naar het Pauliverbod.¹⁴³ Tegelijkertijd schreef Ehrenfest aan Pauli: ‘Ich hatte schon seit langer Zeit das Gefühl, dass Ihr Verbot es ist, das Zunächst die Atome und dadurch die Kristalle vor dem Einschrumpfen bewahrt.’¹⁴⁴

Ehrenfest gaf dit idee weer in een artikel dat in 1927 verscheen in zowel *Die Naturwissenschaften* als *Nature*. Ehrenfest probeerde te laten zien dat het uitsluitingsprincipe van Pauli verantwoordelijk was voor de uitgebreidheid van materie.¹⁴⁵ Voor een eendimensionaal vat stelt hij de

¹⁴¹ P. Ehrenfest en G.E. Uhlenbeck, ‘Die wellenmechanische Interpretation der Boltzmannschen Statistik neben der der neueren Statistiken’, *Zeitschrift für Physik* 41 (1927) 24–26; *CSP*, 536–538.

¹⁴² M&R 6.1, 275–276; Enz, *No time to be brief* (2002) 127–128; Kragh, *Dirac* (1990) 34–36.

¹⁴³ Ehrenfest aan Einstein, 8 januari 1927; Einstein aan Ehrenfest, 11 januari 1927, Ehrenfest aan Einstein, 13 januari 1927, geciteerd in: M&R 6.1, 276–277.

¹⁴⁴ Ehrenfest aan Pauli, 24 januari 1927, in: Hermann, Von Meyenn, Weisskopf, *Wolfgang Pauli. Wissenschaftlicher Briefwechsel I* (1979) 371.

¹⁴⁵ P. Ehrenfest, ‘Relation between the reciprocal impenetrability of matter and Pauli’s exclusion principle’, *Nature* 119 (1927) 196; *CSP*, 546.

Schrödinger-vergelijking op voor de deeltjes, en omdat twee moleculen niet op hetzelfde tijdstip hetzelfde punt in de ruimte kunnen bezetten, gaat Ehrenfest ervan uit dat – net als bij elektronen – alleen de antisymmetrische oplossingen zijn toegestaan voor de moleculen. Omdat deze oplossingen verbonden zijn met het Pauli-verbod, was dit verbod juist de reden voor de ondoordringbaarheid van de materie. Omgekeerd kon volgens Ehrenfest de ongeldigheid van het Pauli-verbod de wederzijdse doordringbaarheid van lichtquanta verklaren.¹⁴⁶

Ehrenfest moest echter later terugkomen op het directe verband tussen de Fermi-Dirac-statistiek en de ondoordringbaarheid van materie. Zijn visualisatie was te eenvoudig. Hij werd door meerdere collega's gewezen op het feit dat de ondoordringbaarheid van materie helemaal niet zo direct samenhang met het bestaan van alleen antisymmetrische oplossingen. In het eendimensionale voorbeeld was dat wel zo, maar niet wanneer men uitging van twee of drie dimensies. Daarvoor waren zowel de symmetrische als de antisymmetrische oplossingen toegestaan voor moleculen met een kleine straal in verhouding tot hun onderlinge afstand.¹⁴⁷ Toch had Ehrenfest kwalitatief duidelijk weten te maken dat het uitsluitingsprincipe de reden was waarom atomen zo 'dik' waren en waarom twee atomen niet zomaar dezelfde ruimte kunnen innemen; de omringende elektronen kunnen zich niet allemaal in dezelfde quantumtoestand bevinden.¹⁴⁸ Toen Pauli de Lorentzmedaille kreeg uitgereikt, merkte Ehrenfest in zijn toespraak op dat een groot deel van onze verkeersproblematiek zou kunnen worden opgelost door een gedeeltelijke opheffing van Pauli's uitsluitingsprincipe.¹⁴⁹

In december 1930 kwamen Ehrenfest en Oppenheimer tot een resultaat dat later de 'Wechselsatz' of wisselwet zou worden genoemd.¹⁵⁰ Met behulp van het uitsluitingsprincipe van Pauli leidden Ehrenfest en Oppenheimer af dat atomen de Bose-Einstein- of Fermi-Dirac-statistiek volgden wanneer het aantal protonen en elektronen even respectievelijk

¹⁴⁶ Zie hiervoor ook: M&R 6.1, 277-278.

¹⁴⁷ M&R 6.1, 277-280.

¹⁴⁸ Feynman e.a., *The Feynman Lectures on Physics III* (1965) 4/14.

¹⁴⁹ P. Ehrenfest, *Address on award of Lorentz Medal to professor W. Pauli* (1931), in: *CSP* 617-622, m.n. 619.

¹⁵⁰ Onder andere werd de wet zo genoemd door Pauli, die het bestaan van het neutrino (later neutron genoemd) afleidde naar aanleiding van een door hem geconstateerde schijnbare afwijking van de regel.

oneven was.¹⁵¹ Deze regel was al langer bekend, maar nooit bewezen. Sommige isotopen weken af van de regel – een anomalie die in 1932 werd verklaard door de ontdekking van een tot dan toe onbekend kerndeeltje: het neutron.

Andere quantumproblemen

Naast zijn belangrijke bijdrage aan het verhelderen van de quantumstatistiek, zorgde Ehrenfest ook op andere gebieden van de quantumtheorie voor verduidelijking. Een van de eerste quantumproblemen waaraan hij werkte na de formulering van zijn adiabatisch theorema, was het paramagnetisme, een onbegrepen effect waarvan de wortels in de quantumtheorie werden gezocht. Ehrenfest liet zien dat in een kristal de Bohratomen zo georiënteerd zijn dat dit de klassieke uitdrukking voor de paramagnetische susceptibiliteit opleverde.¹⁵² Het door Sommerfeld ingevoerde derde quantumgetal voor de quantisering van de ruimtelijke oriëntatie van de elektronbaan werd gezien als quantumtheoretische verklaring voor het paramagnetisme en het Zeeman-effect (In beide gevallen speelt de spin van het elektron echter ook een rol, maar de spin werd pas later ontdekt).¹⁵³ Sommerfelds model gaf echter geen rekenschap van het anomale Zeeman-effect. Om dit te verklaren introduceerde Sommerfeld in 1920 een ander quantumgetal, dat hij het *inwendig quantumgetal* noemde - naar de *ad hoc* veronderstelde, verborgen inwendige rotatie van het atoom. Daarbij bedacht Sommerfeld samen met zijn medewerker Landé dat de atoomkern samen met de omringende elektronen, met uitzondering van het enkele, voor absorptie en emissie van straling verantwoordelijke valentie-elektron, een hoekmoment moest bezitten; dit was het zogenaamde 'atoomrompmodel'. De magnetische wisselwerking tussen het valentie-elektron en de resterende romp zou verantwoordelijk zijn voor het anomale Zeeman-effect en andere details van het spectrum. Landé verbeterde in 1921/22 het model middels de introductie van halfvallige quantumgetallen. Hoewel een stap in de goede richting kon

¹⁵¹ P. Ehrenfest en J.R. Oppenheimer, 'Note on the statistics of nuclei', *Physical Review* 37 (1931) 333-338; *CSP* 597-602.

¹⁵² P. Ehrenfest, 'Note on the paramagnetism of solids', *Proceedings AA* (1920) 989-992; *CSP* 443-446.

¹⁵³ Pauling en Wilson, *Introduction to quantum mechanics* (1935) 45-47.

het anomale Zeemaneffect nog niet helemaal verklaard worden, en bovendien was de complexe structuur van het model onbegrijpelijk.¹⁵⁴

Door de opeenstapeling van allerhande *ad hoc* quantumgetallen en daarop toegepaste *ad hoc* selectieregels werd de quantumtheorie een vreemd bouwwerk. Bohr achtte het bestaan van het anomale Zeemaneffect en de verklaring door het atoomrompmodel en de halfvallige quantumgetallen reden om de tot dan toe gevolgde klassieke theorie overboord te zetten. Het werd noodzaak om het verklaringsvermogen van het opgebouwde atoommodel van Bohr en Sommerfeld nader onder de loep te nemen. Otto Stern en Walther Gerlach voerden te Göttingen een experiment uit om de door Sommerfeld voorgestelde ruimtelijke quantisatie aan te tonen.¹⁵⁵ De door een heterogeen magneetveld geschoten zilveratomen vertoonden de neiging om of naar boven of naar beneden af te buigen, en werden niet zoals klassiek te verwachten viel in alle richtingen verstrooid. Dit leek volledig consistent met het atoommodel van Sommerfeld-Bohr.

Maar er werd te vroeg gejuicht. Einstein en Ehrenfest wezen in een gezamenlijk artikel op een aantal fundamentele moeilijkheden waarmee het Stern-Gerlach-experiment kampte.¹⁵⁶ Ze vroegen zich af hoe de atomen hun oriëntaties verkregen. Ze lieten zien dat het zelfs in een zeer sterk magneetveld zeer lang zou duren voor een verandering in baanrichting van de zilveratomen zou plaatsvinden, namelijk wel 10^9 seconden. In het experiment veranderde de oriëntatie van het atoom in minder dan 10^{-4} seconden. De zilveratomen moesten of al ruimtelijk gequantiseerd zijn, of snelle veranderingen in oriëntatie ondergaan, maar dan zouden de quantumregels worden geschonden. De eerste verklaring eiste ondermeer het loslaten van het onderscheid tussen adiabatische en niet-adiabatische systemen; inmiddels een van de hoekstenen van de oude quantumtheorie.¹⁵⁷

Om dit probleem op te lossen wilde Heisenberg, samen met Bohr en Pauli, wel de radicale stap wagen om de adiabatische invariantie op te

¹⁵⁴ Jammer, *The conceptual development of quantum mechanics* (1966) 118-133.

¹⁵⁵ Gerlach en Stern, 'Das magnetische Moment des Silberatoms' (1922) 353-355.

¹⁵⁶ A. Einstein en P. Ehrenfest, 'Quantentheoretische Bemerkungen zum Experiment von Stern und Gerlach', *Zeitschrift für Physik* 11 (1922) 31-34; *CSP* 4:52-4:55.

¹⁵⁷ M&R 1.2, 443-445; Jammer, *The conceptual development of quantum mechanics* (1966) 134-135.

geven.¹⁵⁸ Nog radicaler was het voorstel van Born en Heisenberg. Zij zagen de discrete oriëntatie van de zilveratomen tot stand komen door een snelle, niet-adiabatische overgang. In deze overgang werden de mechanische wetten overschreden en zouden energie- en impulsbehoud wellicht niet individueel, maar enkel statistisch gelden.¹⁵⁹

Een ander nijpend probleem was de lichtquantumhypothese, die in 1905 door Einstein als heuristische verklaring voor het foto-elektrisch effect was geponeerd. In 1909 pleitte Einstein voor een synthese tussen de problematische lichtquantumhypothese en de klassieke golftheorie van het licht. De correctheid van Einsteins foto-elektrische vergelijking werd in 1916 aangetoond, maar dat betekende niet dat zijn lichtquantumhypothese werd geaccepteerd.¹⁶⁰ Het was zeer de vraag hoe Einsteins hypothese met de klassieke theorie in overeenstemming kon worden gebracht. Charles Galton Darwin en Sommerfeld merkten in 1922 op dat de enige oplossing voor het diepgewortelde golf-deeltjesprobleem wel eens het radicaal loslaten van energiebehoud zou kunnen zijn.¹⁶¹

Bohr – een van de grootste tegenstanders van Einsteins lichtquantum – moest echter lijdzaam toezien hoe in de periode 1921-1923 de steun voor Einsteins lichtquantumhypothese gestaag groeide. Het enige antwoord dat hij hier voorlopig op had was een hardnekkig negeren van de problematiek van de interactie tussen straling en materie.¹⁶² Doorslaggevend voor de acceptatie van het lichtquantum waren de resultaten van verstrooiingsexperimenten van gamma- en röntgenstralen. A.H. Compton was in zijn experimenten aan de diffractie van röntgenstralen aan kristallen gestuit op resultaten die in tegenspraak waren met de klassieke elektrodynamica. Compton verklaarde de door hem waargenomen verschijnselen door röntgenstraling te zien als opgebouwd uit lichtquanta.¹⁶³

¹⁵⁸ Heisenberg aan Sommerfeld, 15 januari 1923, in: M&R 2, 99-100.

¹⁵⁹ M&R 2, 99-100; Born en Heisenberg, 'Über Phasenbeziehungen bei den Bohrschen Modellen' (1923) 44-55.

¹⁶⁰ Pais, *Niels Bohr's Times* (1991) 230-231.

¹⁶¹ Pais, *Niels Bohr's Times* (1991) 234.

¹⁶² Pais, *Niels Bohr's Times* (1991) 232.

¹⁶³ Compton, 'A quantum theory of the scattering of X-rays by light elements' (1923) 483-502.

Epstein en Ehrenfest haakten met een theoretische beschouwing in op het werk van Compton.¹⁶⁴ Ze breidden Comptons behandeling van een oneindige tralie uit met een voorbeeld van een eindige tralie. Ze argumenteerden dat 'het foto-elektrische fenomeen en het Comptoneffect alleen maar verklaard worden door middel van lichtquanta.' Bovendien lieten ze zien dat de klassiek waargenomen Fraunhoferdiffractie zowel op basis van de golftheorie als op basis van het concept van lichtquanta kon worden verklaard. Volgens hen was er maar één uitweg mogelijk: de klassieke golftheorie moest worden aangepast.¹⁶⁵ Datzelfde jaar schreven ze een soortgelijk artikel, dat echter pas in 1927 – na het Davisson-Germer-experiment: langzame elektronen, afgevuurd op een nikkelkristal, vertoonden eenzelfde soort verstrooiing als de lichtquanta in het Compton-effect – door hen werd gepubliceerd.¹⁶⁶ Ehrenfest en Epstein lieten zien dat de klassieke impulsoverdracht voor straling en de impulsoverdracht voor quanta op het kristalrooster aan elkaar gelijk waren. Zij concludeerden dat het nodig was om aan de lichtquanta 'eigenschappen van fase en coherentie toe te schrijven, gelijkwaardig aan die van de golven van de klassieke theorie.'¹⁶⁷ Het lichtquantum kon diverse verschijnselen verklaren; meer en meer kwamen fysici tot de conclusie dat het een noodzakelijk onderdeel moest vormen van een nieuw te vormen theorie.

Bohr bleef zich echter verzetten tegen het lichtquantum. Volgens hem veranderde bij de absorptie of emissie van straling de energie van het atomaire systeem discontinu, op de quantummanier. De elektromagnetische energie van het licht zelf veranderde daarbij echter continu, op de klassieke wijze.¹⁶⁸ Wat volgde was een wanhoopspoging om het tij betreffende de lichtquantumhypothese alsnog te keren. Toen de Amerikaan Slater in 1924 een bezoek bracht aan Kopenhagen, vertelde hij Bohr en Kramers van zijn idee dat lichtquanta zich tegelijk met een soort draaggolf voortbewogen. Bohr en Kramers werkten

¹⁶⁴ M&R 1.2, 556; P.S. Epstein en P. Ehrenfest, 'The Quantum Theory of the Fraunhofer Diffraction', *Proceedings NAS* 10 (1924) 133-139; *CSP* 491-497.

¹⁶⁵ P.S. Epstein en P. Ehrenfest, 'The Quantum Theory of the Fraunhofer Diffraction', *Proceedings NAS* 10 (1924) 133-139, 139.

¹⁶⁶ P. Ehrenfest en P.S. Epstein, 'Remarks on the Quantum Theory of Diffraction', *Proceedings NAS* 13 (1927) 400-408, m.n. 408. Zie ook: *CSP* 491-497.

¹⁶⁷ P. Ehrenfest en P.S. Epstein, 'Remarks on the Quantum Theory of Diffraction', *Proceedings NAS* 13 (1927) 400-408, m.n. 407.

¹⁶⁸ Pais, *Niels Bohr's Times* (1991) 233-234.

Slaters voortbrengsels rigoreus om tot een hypothese waar het lichtquantum ontbrak, en waar Slater achteraf gezien niet helemaal achter stond. Het groeide uit tot een gezamenlijk artikel van Bohr, Kramers en Slater – ook wel het BKS-voorstel genoemd. Daarin zou Bohr energiebehoud ter discussie stellen, zoals al eerder gedaan door Darwin en Sommerfeld. Om Bohrs afwijzing van de lichtquanta vol te houden, was het noodzakelijk om ervan uit te gaan dat energie en impuls tijdens absorptie- en emissieprocessen slechts statistisch behouden zouden blijven. Een jaar later werd dit voorstel echter al door experimenten ontkracht.¹⁶⁹

Ehrenfest zag blijkbaar weinig in deze wanhoopsdaad van Bohr en zijn voormalige student. Toen de hypothese weerlegd werd, klierde hij onder een briefje van Bohr puntig: ‘Der “Bohr-Kramers-Slater-Company” werden hartnäckig die falschen Wechsel unter die Nase gehalten mit denen sie versuchte “etwas dafür zu kaufen.”’¹⁷⁰ Het BKS-voorstel en eerdere ideeën van Born, Heisenberg, Darwin en Sommerfeld tonen temeer aan hoe diep de crisis in de quantumtheorie werd gevoeld. Voor iedere verklaring die door de quantumtheorie werd gegeven bestonden er een of meerdere anomalieën. De roep om en geheel nieuwe theorie werd groter.¹⁷¹

Een gedeeltelijke verlossing kwam in 1925, toen Ehrenfests studenten Goudsmit en Uhlenbeck de elektronspin introduceerden ter onderbouwing van een vierde quantumgetal dat door Pauli was geïntroduceerd. Drie quantumgetallen kwamen overeen met drie vrijheidsgraden; het vierde kon volgens Goudsmit en Uhlenbeck op aanschouwelijke wijze worden voorgesteld als een draaiing. Een tollend elektron bezat een intrinsiek magnetisch moment dat als bijkomstig voordeel de resultaten van het Stern-Gerlach experiment kon verklaren. Goudsmit en Uhlenbeck kwamen op het idee door hun kritische beschouwing van het werk van Pauli. Deze verwierp in 1924 Sommerfelds ‘verborgen rotatie’ van het atoom ten gunste van een tweewaardig quantumgetal voor het elektron, waarmee het elektron vier quantumgetallen kreeg toegekend, en formuleerde zijn beroemd geworden uitsluitingsprincipe in termen van deze vier quantumgetallen. Pauli’s principe bedong dat binnen een atoom twee elektronen zich nooit

¹⁶⁹ M&R 6.1, 20; Pais, *Niels Bohr's Times* (1991) 235-239.

¹⁷⁰ Bohr aan Ehrenfest, 14 oktober 1925, APE ESC 1, sectie 7.

¹⁷¹ Kragh, *Quantum generations* (1999) 159, 161.

in dezelfde quantumtoestand, gekarakteriseerd door die vier getallen, konden bevinden; dit verklaarde de opbouw van het periodieke systeem.

Pauli's extra quantumgetal was een formele constructie, en er werd door Pauli geen aanschouwelijke voorstelling aan verbonden. Uhlenbeck en Goudsmit, door Ehrenfest getraind in het aanschouwelijk maken van de fysica, waren vertrouwd met het beeld dat elk quantumgetal overeenkwam met een vrijheidsgraad. Een puntvormig elektron had slechts drie vrijheidsgraden; een vierde vrijheidsgraad was in hun ogen alleen aannemelijk wanneer het elektron werd voorgesteld als een bolletje dat kon *roteren*. Het vierde quantumgetal was dan aan die rotatie verbonden.

Ehrenfest zag er wel iets in. 'Hij kwam direct onder de indruk, vooral, geloof ik, door het aanschouwelijk karakter van onze veronderstelling, dat zo geheel in zijn lijn lag.'¹⁷² Bovendien had Ehrenfest opgemerkt dat de grootte van het magnetisch moment van het draaiende elektron klassiek kon worden berekend, en dat Compton een roterend elektron al eerder had voorgesteld ter verklaring van de natuurlijke eenheid van het magnetisme. Ehrenfest spoorde hen aan een mededeling voor *Die Naturwissenschaften* te schrijven en die aan hem te geven. Dat deden ze, maar na bezwaren die door Lorentz waren opgeworpen, schrokken Uhlenbeck en Goudsmit terug voor publicatie. Het bleek namelijk dat de magnetische energie van het tollende elektron een massa tot gevolg had die vele malen groter zou zijn dan die van het proton. Ook zou het elektron roteren met een oppervlaktesnelheid die groter was dan de lichtsnelheid. Ehrenfest echter had het artikel al opgestuurd, ondanks het problematische karakter ervan. Zijn motivatie: 'Sie sind beide jung genug om sich eine Dummheit leisten zu können!'¹⁷³

De viering van Lorentz' gouden doctoraat was een goed moment om de spin ter discussie te stellen. Bohr ging voor de festiviteiten per trein op weg naar Leiden, en stopte onderweg in Hamburg. Pauli en Stern informeerden hem daar over de spin. Eenmaal in Leiden werd Bohr opgewacht door Einstein en Ehrenfest. Ehrenfest vroeg Bohr wat hij van de elektronspin dacht. Bohr had reserves, vooral ten aanzien van de vraag hoe uit de wisselwerking tussen het roterende elektron en het magnetisch veld de fijnstructuur van spectraallijnen kon worden verklaard. Ehrenfest deelde hem mee dat Einstein dit probleem had

¹⁷² Uhlenbeck, *Oude en nieuwe vragen der natuurkunde* (1955) 10.

¹⁷³ Uhlenbeck, *Oude en nieuwe vragen der natuurkunde* (1955) 10-11.

opgelost door het elektron in zijn ruststelsel te bekijken. Bohr was onmiddellijk overtuigd. Hij moedigde Uhlenbeck en Goudsmit aan een gedetailleerder stuk te schrijven, waaraan hij een goedkeurend commentaar hechtte. Op de treinreis terug ontpopte hij zich tot een 'Prophet des Elektromagnet-Evangeliums'.¹⁷⁴ In 1926 werd de laatste moeilijkheid voor de theorie uit de weg geruimd. De spin behield alle goede resultaten van het oude Sommerfeld model, en alle eerdere moeilijkheden – zoals met het anomale Zeeman-effect en het Stern-Gerlach-experiment – verdwenen als sneeuw voor de zon.¹⁷⁵ Het succes van de elektronspin leverde het Leidse Instituut voor Theoretische Fysica een enorm prestige op.

Inmiddels was er een begin gemaakt met de nieuwe quantummechanica, die vooralsnog echter geen nieuwe vragen had beantwoord, en bovendien een beroep deed op voor veel fysici geheel nieuwe en abstracte wiskundige methoden.¹⁷⁶ In 1927 deden Dirac en Jordan een poging een quantumtheorie van het elektromagnetische veld te ontwikkelen, maar deze stuitte op veel problemen. In 1929 ontwikkelden Pauli en Heisenberg wat later de basis van de quantumelektrodynamica zou worden. Deze was mathematisch ingewikkeld en onverteerbaar voor veel fysici, en ging gebukt onder vele paradoxale en afwijkende eigenschappen.¹⁷⁷ Na de snelle ontwikkeling van de niet-relativistische quantummechanica van 1925 tot 1927 brak een periode aan van ernstige twijfels. Fysici poogden een grondslag te formuleren voor een nieuwe, relativistisch invariante theorie van het elektromagnetisme. Men verwachtte een doorbraak, maar ondertussen werd de theorie geplaagd door experimentele en conceptuele anomalieën, tegenspraken en onverklaarbare fenomenen. 'Theoretical physics... is in a hell of a way', merkte Oppenheimer op in 1933.¹⁷⁸

Net als Bohr en anderen worstelde Ehrenfest met de verhouding tussen de nieuwe quantummechanica en de traditionele klassieke mechanica. Publicaties van De Broglie, Brillouin, Schrödinger, Debye, Heisenberg en

¹⁷⁴ Pais, *Niels Bohr's Times* (1991) 243-244; Frenkel, 'Physik und Kritik: Paul Ehrenfest' (1970) 40.

¹⁷⁵ Pais, *Niels Bohr's Times* (1991) 244.

¹⁷⁶ Kragh, *Quantum generations* (1999) 163.

¹⁷⁷ Kragh, *Quantum generations* (1999) 197.

¹⁷⁸ Kragh, *Quantum generations* (1999) 198-199.

Kennard toonden aan dat de klassieke mechanica geldig bleef voor macroscopische systemen. Ehrenfest stuitte op een elegante manier om de overgang van quantumregels in klassieke wetten te demonstreren. Op 5 september 1927 ontving het *Zeitschrift für Physik* het artikel *Bemerkungen über die angenäherte Gültigkeit der klassischen Mechanik innerhalb der Quantenmechanik*.¹⁷⁹ Binnen de quantummechanica wordt niet meer gesproken van positie of impuls van een deeltje, maar van de verwachtingswaarde; de gemiddelde waarde van een serie metingen aan positie of impuls van een deeltje. Ehrenfest liet zien dat de verwachtingswaarden voor de impuls en de plaats voldoen aan de klassieke Newtoniaanse bewegingsvergelijkingen. Voor voldoende grote afstanden en impulsen, wanneer het onzekerheidsprincipe kan worden genegeerd, gaat de quantummechanica naadloos over in de Newtoniaanse mechanica. Dit inzichtelijke theorema zorgde voor conceptuele verheldering van de quantummechanica en heeft als zodanig zijn weg gevonden in de leerboeken.¹⁸⁰

Ehrenfest probeerde hier niet om de quantummechanica op enigerlei wijze te verzoenen met de klassieke mechanica. Even hiervoor had Lorentz in de voorbereiding op het Solvaycongres van 1927 voor het hoofdonderwerp van de bijeenkomst de titel gekozen: ‘de strijd en de mogelijke verzoening tusschen de klassieke theorieën en der theorie der quanta’. Ehrenfest was echter sterk gekant tegen pogingen tot een mogelijke verzoening, en liet aan Lorentz weten dat Bohr zich nog feller tegen pogingen om de quantummechanica te integreren binnen de klassieke fysica zou uitspreken. Juist binnen de ‘vruchtbare hardheid’ van

¹⁷⁹ P. Ehrenfest, ‘Bemerkungen über die angenäherte Gültigkeit der klassischen Mechanik innerhalb der Quantenmechanik’, *Zeitschrift für Physik* 45 (1927) 455-457; *CSP* 65, 556-558.

¹⁸⁰ Zie bijvoorbeeld: Bransden en Joachain, *Quantum Mechanics* (2000) 98-100, 257-258. Oudere leerboeken gebruiken ook wel een andere methode – de Wentzel-Kramers-Brillouin methode – die echter veel omslachtiger is en niet direct inzichtelijk. Zie bijvoorbeeld: Pauling en Wilson, *Introduction to Quantum Mechanics* (1935) 198-201. Binnen de quantummechanica neemt de onzekerheid in plaats en impuls toe met de tijd. Na een zekere tijd is de hele beweging dermate onscherp geworden dat we niet meer weten waar het deeltje zich in een systeem bevindt. Ehrenfest berekende de tijd waarbinnen de baan van een golfpakket onscherp wordt – de Ehrenfesttijd. Pas recentelijk is men in Leiden erin geslaagd Ehrenfests voorspelling experimenteel te toetsen. Zie: Tajic, *Study of a stroboscopic model of a quantum dot* (2005).

het conflict zouden de fundamenteen worden gevormd voor een toekomstige theorie die onverenigbaar zou zijn met de klassieke fysica.¹⁸¹

Dat laat onverlet dat Ehrenfest steeds meer bedenkingen kreeg tegen de manier waarop de quantummechanica verder ontwikkeld werd. In 1932 verwoordde hij een aantal fundamentele vragen betreffende de theorie in het artikel: *Einige die Quantenmechanik betreffende Erkundigungsfragen*.¹⁸² Ehrenfest opende dit artikel met de woorden:

‘Es sei gestattet, im folgenden einige Fragen zusammenzustellen, die sich in ähnlicher Weise fast jedem Dozenten aufgedrängt haben müssen, der einem interessierten und zur Kritik erzogenen Zuhörerkreis die Quantenmechanik einführend darzulegen hatte. Wohl können diese Fragen, besonders in der vorliegenden Fassung, als „sinnlos“ zur Seite geschoben werden, wenn man es sich bequem machen will. Der gute Ton verlangt das sogar. Nun, dann muss eben irgendwer das Odium auf sich nehmen, sie dennoch zu stellen. Im festen Vertrauen darauf, dass es noch immer einzelne Forscher gibt, die die Kunst verstehen „sinnlose“ Fragen sinnvoll zu beantworten, und zwar in klarer, einfacher Weise.’¹⁸³

Peierls en Pauli vonden Ehrenfests vragen zeer interessant, en schreven per brief uitvoerige antwoorden.¹⁸⁴ Ehrenfest begreep nog niet alles, en moedigde Pauli en Peierls aan hun opmerkingen te publiceren, iets dat Pauli ook daadwerkelijk deed.¹⁸⁵

Ehrenfest keek onder meer naar de voor de hand liggende analogie tussen het door de Maxwell-vergelijkingen bepaalde

¹⁸¹ Lorentz aan Ehrenfest, 29 maart 1926; Ehrenfest aan Lorentz, 30 maart 1926; Lorentz aan Ehrenfest, 18 januari 1927, APE ESC 7, sectie 8.

Daaropvolgend veranderde Lorentz de titel van de conferentie in het neutralere: ‘De quantatheorie en de klassieke theorieën der straling’.

¹⁸² P. Ehrenfest, ‘Einige die Quantenmechanik betreffende Erkundigungsfragen’, *Zeitschrift für Physik* 78 (1932) 555-559; CSP 623-627.

¹⁸³ P. Ehrenfest, ‘Einige die Quantenmechanik betreffende Erkundigungsfragen’, *Zeitschrift für Physik* 78 (1932) 555.

¹⁸⁴ R. Peierls aan Ehrenfest, 26 oktober 1932, APE ESC 8, sectie 7; W. Pauli aan Ehrenfest, 28 oktober 1932, APE ESC 8, sectie 6.

¹⁸⁵ Ehrenfest aan R. Peierls, 31 oktober 1932, APE ESC 8, sectie 7; W. Pauli, ‘Einige die Quantenmechanik betreffende Erkundigungsfragen’, *Zeitschrift für Physik* 80 (1933) 573-586.

elektromagnetische veld en de door de Schrödingervergelijking bepaalde golf functie ψ . Het was onduidelijk waarom in de Schrödingervergelijking, anders dan in de elektrodynamische vergelijkingen, een imaginaire eenheid werd geïntroduceerd. Men zou ook moeten kunnen overzien waarom slechts $\psi\psi^*$ kon worden gemeten en niet ψ zelf, terwijl de elektrische en magnetische veldcomponenten zelf wel meetbaar waren.¹⁸⁶ 'Wir sollten uns immer wieder daran erinnern, eine wie *unheimliche Fernwirkungstheorie* also die Schrödingersche Wellentheorie ist, um unser Heimweh nach einer vierdimensionalen *Nahwirkungstheorie* wach zu halten! Gewisse, durch Einstein ersonnene, aber nie im Druck publizierte Gedankenexperimente sind hierfür sehr geeignet.'¹⁸⁷

Ehrenfest doelde hier op discussies die hij met Einstein had gehad betreffende de quantummechanica, die hieronder zullen worden toegelicht. Einstein had de kans gekregen om de nieuwe quantummechanica aan te vallen op het Solvaycongres van 1927. Hij weigerde deze te openen, en liet de opening aan Bohr over – die zoals gebruikelijk in onbegrijpelijk Bohriaans van start ging.¹⁸⁸ Na veel langs elkaar heen praten – waarbij Ehrenfest op een gegeven moment naar voren liep en op gevatte wijze een bijbelcitaat over de Babylonische spraakverwarring op het bord schreef¹⁸⁹ – lukte het Bohr om uiteindelijk alle bezwaren te weerleggen.

Einstein hield zich al die tijd op de vlakte. Hij roerde zich pas bij het diner, waarbij hij opmerkte dat een bundel elektronen die door een nauwe spleet valt een diffractiepatroon zal veroorzaken op een scherm. Bekijken we echter een individueel elektron, dan zal de golf functie voor dit elektron worden uitgespreid over het scherm (dat wil zeggen: ieder punt op het scherm heeft een bepaalde waarschijnlijkheid, ongelijk nul, om door het elektron geraakt te worden). Wanneer echter bepaald is op welke plaats op het scherm het elektron terecht is gekomen, dan wordt de waarschijnlijkheid om het elektron op een andere plaats op het scherm

¹⁸⁶ Ook Lorentz en Schrödinger zelf hadden moeite met de imaginaire component die Schrödinger in een later stadium aan de golfvergelijking had toegevoegd. Zie o.a.: Yang, 'Square roots of minus one' (1987) 53-64.

¹⁸⁷ P. Ehrenfest, 'Einige die Quantenmechanik betreffende Erkundigungsfragen', *Zeitschrift für Physik* 78 (1932) 555-559, m.n. 557, n.1.

¹⁸⁸ Ehrenfest aan Goudsmit, Uhlenbeck en Dieke, 3 november 1927, in: Kalckar, *N. Bohr. Collected Works, Vol. 6* (1985) 415-418.

¹⁸⁹ Marage en Wallenborn, 'The debate between Einstein and Bohr' (1999) 161-174, m.n. 169.

aan te treffen instantaan gelijk aan nul. Volgens Einstein kon dit twee dingen betekenen. Eén mogelijkheid was het optreden van een mysterieuze vorm van non-localiteit, wat in tegenspraak zou zijn met Einsteins relativiteitspostulaat, die instantane werking op afstand verbiedt. Een andere mogelijkheid was dat er wel degelijk een welbepaalde baan aan het elektron kon worden toegeschreven, wat leidde tot de conclusie dat de golfmechanica niet compleet was.¹⁹⁰ Compleetheid hield volgens Einstein het volgende in. Wanneer met zekerheid (waarschijnlijkheid gelijk aan 1) de waarde van een fysische grootte kon worden vastgesteld, dan diende er een element binnen de fysische realiteit te bestaan die correspondeerde met die fysische grootte. Deze correspondentie leidt tot de noodzakelijke voorwaarde voor de compleetheid van een theorie, namelijk dat ieder element van de fysische werkelijkheid een corresponderend element in de fysische theorie moet hebben.

Bohr ging hierna met steun van Ehrenfest – die altijd trachtte Bohrs onbegrijpelijke gedachtegangen helder te krijgen – de discussie aan met Einstein. De volgende morgen had Bohr een antwoord gereed, namelijk dat de quantummechanica slechts iets zegt over de waarschijnlijkheid om een deeltje op een bepaalde positie op het scherm aan te treffen, en niets over het causale mechanisme van de diffractie. Zo ging het over en weer; 's avonds discussies tussen Bohr en Einstein, waarbij Ehrenfest, in de woorden van Bohr, 'took part in a most active and helpful way.'¹⁹¹ Einstein, als een 'duveltje uit een doosje', kwam iedere morgen weer met nieuwe tegenvoorbeelden, die tot Ehrenfests genoegen steeds weer werden weerlegd door Bohr. Ehrenfest was naar eigen zeggen 'zonder reserve pro-Bohr en contra-Einstein'.¹⁹²

Volgens Ehrenfest kwam Einsteins afwijzing van Bohrs denkbeelden overeen met de rigide opstelling van de tegenstanders van de relativiteitstheorie. Maar ook al kon en wilde hij Einstein niet volgen in diens standpunten, de onenigheid tussen Bohr en Einstein bracht hem danig van zijn stuk. Ehrenfest gaf aan niet te kunnen rusten tot zijn twee

¹⁹⁰ M&R 6.2, 715; Jammer, 'The EPR Problem in its Historical Development' (1985) 129-149; Pais, *Niels Bohr's Times* (1991) 318-319; Jammer, *The conceptual development of quantum mechanics* (1966) 360.

¹⁹¹ Bohr, 'Discussion with Einstein on Epistemological Problems in Atomic Physics' (1996) 341-381, m.n. 213.

¹⁹² Ehrenfest aan Goudsmit, Uhlenbeck en Dieke, 3 november 1927, in: Kalckar, *N. Bohr. Collected Works, Vol. 6* (1985) 415-418.

oude vrienden het met elkaar eens konden worden.¹⁹³ Dat was geen overdrijving. Terug in Leiden vertelde een huilende Ehrenfest aan Goudsmit dat hij had moeten kiezen tussen de standpunten van Bohr en Einstein, en dat hem niets anders restte dan zich uit te spreken ten gunste van Bohrs visie.¹⁹⁴

Op het volgende Solvaycongres in oktober 1930 kwam Einstein met een ander idee. Hij trachtte wederom aan te tonen dat de quantummechanica niet aan de voorwaarde voor compleetheid voldeed. Hij maakte hiervoor gebruik van een 'fotondoos'. Het gedachte-experiment gaat als volgt in zijn werk. Een doos gevuld met straling wordt gewogen. De doos is voorzien van een klein gat, dat door een sluitmechanisme, aangesloten op een klok, kan worden geopend en gesloten. Op een bepaald tijdstip wordt de sluit voor zo'n korte periode geopend, dat slechts één foton kan ontsnappen. De doos wordt wederom gewogen, waardoor zowel het ontsnappingstijdstip als de energie van het foton kunnen worden bepaald. Dat was in tegenspraak met Heisenbergs onzekerheidsrelatie.¹⁹⁵

De volgende ochtend pareerde Bohr het tegenargument van Einstein, en wel met Einsteins eigen algemene relativiteitstheorie. Door het ontsnappende foton zal de doos iets op de weegschaal omhoog bewegen, waarbij de klok in de doos anders gaat lopen. Volgens het equivalentieprincipe oefent het zwaartekrachtsveld invloed uit op de gang van een klok en dus is kennis van de exacte positie van de klok in het zwaartekrachtsveld nodig is voor een exacte tijdsbepaling. Door de onzekerheid in de verplaatsing van de doos treedt een corresponderende onzekerheid in de tijdsmeting op, volledig in overeenstemming met Heisenbergs onzekerheidsrelatie.¹⁹⁶

Einstein bleef over de fotondoos nadenken en kwam tot de conclusie dat Bohrs argument kon worden vermeden door een systeem te

¹⁹³ Bohr, 'Discussion with Einstein on Epistemological Problems in Atomic Physics' (1996) 341-381, m.n. 218.

¹⁹⁴ Pais, *Subtle is the Lord* (2005) 443.

¹⁹⁵ Hoewel het erop leek dat Einstein zijn voorbeeld tegen de onzekerheidsrelatie had uitgedacht, had hij tegen Ehrenfest verteld dat hij allang de onzekerheidsrelatie accepteerde, maar dat hij zijn pijlen richtte op de compleetheid van de quantummechanica. Zie: Ehrenfest aan Bohr, 9 juli 1931, APE ESC 1, sectie 8.

¹⁹⁶ Pais, *Niels Bohr's Times* (1991) 427.

Bohr en Einstein in discussie in Ehrenfests huis, ca. 1925-1930.

Photograph by Paul Ehrenfest, courtesy AIP Emilio Segre Visual Archives

bedenken waarin alleen sprake was van horizontale beweging.¹⁹⁷ In 1931 beschreef Einstein een andere versie van het experiment, waarbij twee deeltjes werden uitgezonden door de doos.¹⁹⁸ In een volgende versie werd de fotondoos op wrijvingsloze rails gezet. In de doos bevindt zich een foton van onbekende frequentie. Als de sluiters nu wordt geopend kan een waarnemer op de doos twee opties kiezen: of hij bepaalt de positie van de doos op de rails en voorspelt het tijdstip waarop het foton op een verderop gelegen scherm arriveert, of hij meet de impulsverandering van de doos ten gevolge van de uitzending van het foton en voorspelt met welke energie het foton het scherm zal raken. Het is absurd om de gebeurtenissen op een veraf gelegen scherm te laten afhangen van welke meting er verderop plaatsvindt.

¹⁹⁷ Jammer, 'The EPR Problem in its Historical Development' (1985) 133.

¹⁹⁸ Einstein, Tolman, Podolski, 'Knowledge of Past and Future in Quantum Mechanics' (1931) 780-781; M&R 6.2, 717-718.

Volgens Einstein was de uitkomst van dit gedachte-experiment dat het foton te allen tijde een welbepaalde positie en energie moest hebben, in tegenstelling tot wat de quantummechanica ons vertelt.¹⁹⁹ Het was Ehrenfest die dit gedachte-experiment onder de aandacht van Bohr bracht. Ehrenfest nodigde Bohr en Einstein voor een paar dagen uit in Leiden om te praten over de fundamentele problemen van de quantummechanica, en lichtte Bohr alvast in over Einsteins nieuwste gedachte-experiment.²⁰⁰ Ehrenfest hoopte Einstein tijdens de bespreking te kunnen helpen Bohrs ondoorgrondelijke redeneringen beter te kunnen begrijpen. 'Ich werde Euch ganz sicher nicht in Euren Besprechungen stören hoffe aber manchmal Einstein helfen zu können, Deine Andeutungen müheloser zu verstehen.'²⁰¹

Het kwam er echter niet van; Bohr was te druk. Ehrenfests kritiek deed Einstein ondertussen besluiten af te stappen van zijn fotondoos, en over te gaan op een gedachte-experiment waarbij twee deeltjes met elkaar een interactie aangingen. Ehrenfest trof Einstein in Rotterdam, waar Einstein per boot aankwam na een reis naar de VS. Een dag later schreef Einstein aan Ehrenfest over een nieuwe versie van het experiment: 'Lieber Ehrenfest! Du hast mich gestern drauf gestupft, das 'Kasten-experiment' so abzuändern, dass es dem Wellen-Theoretiker weniger fernliegende Begriffe verwendet.'²⁰² Het gedachte-experiment ging nu uit van een foton dat op een zwaar deeltje botste, en waarbij de impuls en positie van het deeltje konden worden bepaald door de corresponderende grootheden van het foton te meten.

Einstein kwam zo op een van de uitgangspunten van zijn beroemde paradox, die hij in 1935 samen met Podolski en Rosen publiceerde: de Einstein-Podolski-Rosen- of EPR-paradox. Volgens de auteurs is de quantummechanica geen complete theorie, en dat proberen ze te laten zien met behulp van een aangepaste versie van Einsteins eerdere gedachte-experiment.

In dit gedachte-experiment gaan twee deeltjes, met welbepaalde onderlinge impuls en plaats, een locale interactie met elkaar aan. Lang na de interactie wordt de plaats van deeltje 1 gemeten; dit levert onmiddellijk informatie over de positie van deeltje 2. Ook de impuls van

¹⁹⁹ Jammer, 'The EPR Problem in its Historical Development' (1985) 133-134.

²⁰⁰ Ehrenfest aan Bohr, 9 juli 1931, APE ESC 1, sectie 8.

²⁰¹ Ehrenfest aan Bohr, 15 november 1931, APE ESC 1, sectie 8.

²⁰² Einstein aan Ehrenfest, 5 april 1932, geciteerd in: Jammer, 'The EPR Problem in its Historical Development' (1985) 136.

deeltje 1 kunnen we na de interactie bepalen, en daarmee weten we ook meteen wat de impuls van deeltje 2 is. Dit kunnen we doen zonder deeltje 2 ooit zelf te hoeven ‘ondervragen’. We kunnen volgens Einsteins eerder genoemde criterium realiteit toekennen aan die eigenschappen van het systeem die we kunnen bepalen zonder op enige manier het systeem te verstoren; zowel plaats als impuls van elk van de deeltjes bezit op elk moment dus realiteitswaarde. Deze werkelijkheid wordt door de quantummechanica niet gereproduceerd – volgens de quantummechanica kunnen we nooit tegelijkertijd de impuls en plaats van deeltje 2 te weten komen – en bij gevolg is de theorie volgens Einstein, Podolski en Rosen, incompleet.²⁰³ Bohr wist de EPR-paradox uiteindelijk te pareren, al was Bohrs duistere oplossing volgens Einstein ondeugdelijk.

Slot

Wat was nu het belang van Ehrenfests onderzoek? Kijken we alleen naar zijn artikelen, dan zouden we kunnen concluderen dat Ehrenfest geen nieuwe, grensverleggende ontdekkingen deed zoals zijn generatiegenoten Bohr en Einstein, of zoals de oudere Lorentz had gedaan. Zijn enige noemenswaardige vondst, de adiabatische hypothese, was wel belangrijk voor de ontwikkeling van de oude quantumtheorie, maar was geen lang leven beschoren. Ehrenfest was er ook niet bepaald op uit om spectaculaire ontdekkingen te doen. Hij ontwikkelde de adiabatische hypothese in zijn zoektocht naar een grondslag van de quantumtheorie in de klassieke natuurkunde.

Dat brengt ons tot de achtergrond van Ehrenfests werk. Bijna al zijn onderzoek zouden we tegenwoordig kwalificeren als grondslagenonderzoek, en het richtte zich dikwijls ook op het bekritisieren en verhelderen van het werk van anderen. Dat resulteerde dan wel niet in spectaculaire ontdekkingen, maar Ehrenfests kritische exposés zorgden er wel voor dat keer op keer problematische aspecten van theorieën en ideeën aan het licht kwamen. Ook tijdens de vele discussies die hij met fysici had, speelde Ehrenfest vaak een belangrijke rol in het signaleren van zwakheden, onduidelijkheden en tegenspraken in andermans werk. Ehrenfest oogste vanwege zijn aandacht voor de

²⁰³ Pais, *Niels Bohr's Times* (1991) 429-431. Zie voor het EPR experiment en de aanloop daartoe ook: Fine, *The Shaky Game* (1986) 26-39.

grondslagen van de fysica, evenals voor zijn rol als 'katalysator', veel waardering onder collega's. Hij speelde een rol als mediator en zag het als zijn missie om wetenschappers bij elkaar te brengen. Hij was een belangrijke sparringpartner voor fysici, zoals Einstein en Bohr, en hij zweepte anderen op tot grote prestaties. Hij behoorde tot de selecte groep fysici die steevast werd uitgenodigd op de Solvaycongressen, en behoorde dus wel degelijk tot de top van zijn vakgebied. Zo gezien is Ehrenfests rol in het onderzoek veel groter dan je enkel op grond van alleen zijn publicaties zou verwachten. Het voorbeeld van Ehrenfest illustreert een belangrijk gegeven, namelijk dat veel nieuwe wetenschappelijke resultaten veeleer het gevolg zijn van een collectieve dan een individuele inspanning. De eer gaat echter volledig naar degene die het publiceert.

Hoewel Ehrenfest een alom gerespecteerd fysicus was, konden vooral veel jongere fysici maar weinig waardering opbrengen voor Ehrenfests kritiek en zijn nadruk op de logische consistentie van een fysische theorie. Zij waren veeleer resultaatgericht, geneigd nieuwe wegen in te slaan, zonder zich al te zeer te bekommeren om een solide onderbouwing van de verkregen resultaten. Ehrenfest had op zijn beurt moeite met het gebrek aan werkelijk inzicht dat in zijn ogen uit het werk van de jongere fysici sprak.

De preoccupatie met de grondslagen van de fysica, die zo nadrukkelijk naar voren kwam in de laatnegentiende-eeuwse discussies over de mechanische, energetische of elektromagnetische fundering van de fysica en die een late echo beleefde in de debatten over de interpretatie van de quantummechanica, maakte in de loop van het interbellum plaats voor een meer instrumentele kijk op fysische theorieën. Wat de achtergrond was van deze omwenteling in onderzoeksstijl, hoe ze tot stand kwam, en hoe fysici zoals Ehrenfest hierop reageerden, is onderwerp van het volgende hoofdstuk.

Hoofdstuk 4

Quantumtheorie en moderniteit¹

Die Mathematik ist unmenschlich wie jede wirklich teuflische Maschine [...].²

Inleiding

In het jaar 1928 ontving de Russische fysicus Abraham Joffe een aantal emotionele brieven van zijn vriend Paul Ehrenfest. In die brieven biechtte Ehrenfest op de nieuwste ontwikkelingen binnen de quantumfysica niet meer te kunnen volgen. Hij suggereerde zelfs dat Joffe hem wellicht zou kunnen aannemen als experimenteel fysicus. Zou hij eenvoudige experimenten kunnen uitvoeren, dan hoefde hij zich niet langer druk te maken over de laatste theoretische ontwikkelingen.³ In brieven aan zijn familie merkte Ehrenfest op dat de theoretische fysica ‘sich in den letzten zwei Jahren in einer so explosieven und chaotischen Entwicklung befindet, mit den allerjüngsten Fachgenossen in der Front, dass wir etwas Älteren und wenigstens ich selber nur mit sehr grosser Anspannung der Entwicklung mit kritischem Verständnis zu folgen vermögen.’ Ondanks tien uur werk per dag bleef Ehrenfest steken in iedere nieuwe publicatie die verscheen. Deels had dit te maken met een nieuwe, resultaatgerichte stijl van publiceren, die de artikelen volgens Ehrenfest onleesbaar maakte. Deels hadden zijn problemen te maken met de ‘Verwendung von fürchterlichen mathematischen Canonen’ in de artikelen. Door de razendsnelle ontwikkelingen binnen de theoretische fysica en het gebruik van onbekende wiskunde zag de oudere Ehrenfest zich voorbijgestreefd door piepjonge vakgenoten.⁴

¹ Delen van dit hoofdstuk zijn verwerkt in: Hollestelle, ‘The Quantum in the Work of Paul Ehrenfest’ (2008).

² Ehrenfest aan Tanja Ehrenfest, 17 november, 1928; APE EPC 1, sectie 6.

³ Ehrenfest aan A.F. Joffe, ESC 6, sectie 1, 26 april 1928.

⁴ Ehrenfest aan Arthur Ehrenfest, 28 augustus 1928; Ehrenfest aan Tanja Ehrenfest, 24 september 1928, EPC 1, sectie 6.

In dit hoofdstuk zal ik laten zien dat Ehrenfests klachten sterk samenhangen met veranderingen binnen de wetenschap die ook andere wetenschappers in zijn tijd als problematisch beleefden. Het ging hier om verschijnselen als steeds verder doorgevoerde specialisatie, resulterend in vervreemding, toenemende publicatiedruk en daarmee gepaard gaande gejaagdheid, en bovenal een toenemend instrumentalistische houding ten aanzien van natuurkundige theorieën die ten koste gingen van inzicht. De veranderingen hingen op hun beurt weer samen met meer algemene maatschappelijke moderniseringstendensen. Het tempo waarin technologie en maatschappij veranderden, leek in de periode van 1900 tot 1940 steeds meer toe te nemen. Moderne communicatie- en transportmiddelen breidden zich snel uit, en daarmee samenhangend kwam informatie steeds sneller en in steeds grotere hoeveelheden beschikbaar. Men kon de ontwikkelingen eenvoudigweg niet meer bijhouden. Ook natuurwetenschappers zagen de ontwikkelingen in hun vakgebied sneller en sneller gaan; scoringsdrift dreef wetenschappers tot steeds snellere publicatie.⁵

Volgens bezorgde intellectuelen ontbrak het zowel in de maatschappij als in de wetenschap aan samenhang. In alle culturele domeinen werd ‘fragmentatie’ onderwerp van debat. In de natuurwetenschap betekende fragmentatie een almaar groeiende specialisatie. In elk cultureel domein – politiek, kunst, religie en wetenschap – ontstond een zoektocht naar een nieuwe synthese om de toenemende verbrokkeling tegen te gaan.⁶

Critici constateerden een groeiende nadruk op techniek ten koste van inzicht. In 1921 schreef de bekende Duitse cultuurcriticus Spengler over de tegenstelling tussen ‘Zivilisation’ en ‘Kultur’. Zivilisation was mechanisch, gefragmenteerd, en emotioneel. Kultur stond voor innerlijke beschaving en cultuurwaarden.⁷ In Spenglers ogen was de bloeitijd van de Westerse cultuur (Kultur) achter de rug en de opmars van de civilisatie (Zivilisation) een symptoom van de naderende ondergang van de Westerse beschaving. Vandaar de titel van zijn boek: *Untergang des Abendlandes*.

⁵ Baneke, *Synthetisch denken* (2008) 24-25; Van der Woud, *Een nieuwe wereld* (2006) 335.

⁶ Baneke, *Synthetisch denken* (2008).

⁷ Baneke, *Synthetisch denken* (2008); Spengler, *Der Untergang des Abendlandes* (1921).

Max Weber signaleerde begin twintigste eeuw een soortgelijke tegenstelling. Hij onderscheidde 'doelrationaliteit' (Zweckrationalismus) van 'waardenrationaliteit' (Wertrationalismus). Doelrationaliteit wordt volgens Weber gekenmerkt door een calculerende, resultaatgerichte en systematische werkwijze en emotionele neutraliteit. Bij waardenrationaliteit vloeit het handelen voort uit fundamentele waarden en berust derhalve op maatstaven voor wat zinvol is of niet. Weber signaleerde een steeds sterkere verschuiving in de moderne Westerse wereld richting het doelrationalisme. De daarmee gepaard gaande bureaucratisering zag hij als een bedreiging voor de individuele vrijheid. De moderne economische orde, gebaseerd op mechanische productie en specialisatie, bracht welvaart ten koste van een brede blik en verwerd daarmee tot een 'ijzeren kooi' van dwangmatige handelingen.

Model voor de door Spengler en Weber gelaakte ontwikkelingen stond de opkomende grootmacht Amerika. Aspecten daarvan meende men ook terug te zien in de Amerikaanse wetenschap, die eind negentiende eeuw begonnen was aan een snelle opmars. Europese geleerden bezagen een en ander met een mengeling van enthousiasme en weerzin. Men bewonderde de tomeloze energie van de Amerikanen en benijdde hen om de rijkdom van hun universiteiten. Maar men wees ook naar de schaduwzijden van het Amerikaanse systeem van onderzoek en onderwijs. Aan Amerikaanse universiteiten zou teveel nadruk worden gelegd op nuttige toepassingen van wetenschappelijk onderzoek.⁸ Het pragmatisme – een Amerikaanse filosofie die eind negentiende, begin twintigste eeuw was ontwikkeld – vierde hoogtij. Hoofdelementen van het pragmatisme waren nut, waarde en succes;⁹ het had alle kenmerken van Zivilisation en Zweckrationalismus, en druiste in tegen de idealen van door Europese geleerden nog fier in het banier gevoerde Kultur en Wertrationalismus. Ook Nederlandse geleerden meenden dat het bij de Amerikanen ontbrak aan 'een zekere kulturele basis'.¹⁰ Er werd alom gewaarschuwd voor de gevreesde 'Amerikanisering' van de Nederlandse universiteiten.

De theoretische fysica veranderde in de eerste dertig jaar van de twintigste eeuw ingrijpend. Niet alleen kwamen radicaal nieuwe

⁸ Zie over de amerikanisering: Van Berkel, 'Amerikanisering van de Nederlandse Universiteit?' (1989) m.n. 220-222.

⁹ Voor een korte geschiedenis van het pragmatisme: Störig, *Geschiedenis van de filosofie* (2002) 611-614.

¹⁰ Idenburg aan Ehrenfest, 6 augustus 1930, APE ESC 5, sectie 9.

theorieën tot stand, ook doel en methode van het vakgebied veranderden ingrijpend. In dit hoofdstuk wil ik laten zien dat die laatste veranderingen samenhangen met de genoemde, als problematisch beschouwde ‘bijwerkingen’ van de moderniseringsprocessen. Ehrenfest plaatst de veranderingen in zijn vakgebied ook nadrukkelijk in dat perspectief. In zijn bezwaren stond hij zeker niet alleen. Hij vond veel bijval van vooral generatiegenoten en oudere fysici.

Voor een goed beeld van die veranderingen is het nodig eerst in te gaan op het ontstaan van de theoretische fysica als zelfstandig specialisme. Dat is nodig om de volgende paragraaf te begrijpen, waar de verdere specialisatie van het vakgebied in de jaren rond 1926 aan bod komt, en de toenemende fragmentatie zichtbaar wordt die deze specialisatie met zich meebracht. In de volgende twee paragrafen komt aan de orde hoe het vakgebied vanaf 1900 steeds verder gemathematiseerd werd. In de daaropvolgende twee paragrafen wordt beschreven hoe die ontwikkeling, gecombineerd met de toenemende publicatiesnelheid, zorgde voor een verlies van aanschouwelijkheid en samenhang. Ehrenfest en anderen probeerden in hun vorming van nieuwe fysici tevergeefs de opmars van de ‘nieuwe stijl’ te stuiten. In de laatste paragraaf wordt beschreven wat voor gevolgen de moderne ontwikkelingen binnen het vakgebied hadden voor Ehrenfest en andere fysici.

Ontstaan van de theoretische fysica

In de periode dat Ehrenfest naar Leiden kwam bevond de theoretische fysica zich aan het eind van een proces van toenemende verzelfstandiging. In de tweede helft van de negentiende eeuw gold de ideale fysicus als iemand die experimenteel onderzoek met wiskundige theorievorming combineerde. Artikelen in de *Annalen der Physik* waren in de jaren rond 1880 bijna altijd een combinatie van een experimenteel en een theoretisch deel, waarbij het laatste diende om de experimentele resultaten van een context te voorzien.¹¹ De opkomst van universiteitslaboratoria in de tweede helft van de negentiende eeuw ondermijnde het ideale eenheidsbeeld van experiment en theorie. Duitsland liep in dit opzicht voorop. Door de toenemende tijd en energie

¹¹ Jungnickel en McCormmach, *Intellectual Mastery of Nature*, 98-100.

die de hoogleraar kwijt was aan het leidinggeven aan laboratoriumwerk, werd het onderwijs in de mathematische fysica steeds meer gedelegeerd aan speciaal daarvoor aangestelde buitengewone hoogleraren. Dit had niet de onmiddellijke ontwikkeling van een nieuw specialisme tot gevolg. Aanvankelijk werd een buitengewone leerstoel vooral gezien als een carrièrestap richting het hoger geschatte ordinariaat in de experimentele fysica, dat gepaard ging met het directoraat van het laboratorium.¹²

Rond de eeuwwisseling klaagden Wien en Voigt dat de theoretische fysica door jongere fysici als minderwaardig werd beschouwd.¹³ Theoretisch fysici als Planck en Boltzmann deden hun best om de theoretische fysica uit de schaduw van de experimentele traditie te laten treden. De eerder genoemde discussies over de grondslagen van de fysica, waarin Boltzmann, Planck en Wien een actieve rol speelden, moeten tevens in dit licht worden gezien. Iets soortgelijks geldt voor het door genoemde fysici bepleitte gebruik van de term 'theoretische fysica' in plaats van de oudere term 'mathematische fysica'. Die mathematische fysica behoorde ooit tot het terrein van de wiskundigen en velen plaatsten het specialisme nog steeds in het grensgebied van de wis- en de natuurkunde. De geprefereerde term 'theoretische fysica' diende de boodschap over te brengen dat dit gebied zich in het hart van de fysica bevond.

Vermoedelijk speelden dergelijke overwegingen ook mee in hun neiging het belang van de wiskunde in de theorie te minimaliseren. Hoewel Planck zich meer dan wie ook sterk maakte voor de emancipatie van de theoretische fysica, hoedde hij zich ervoor de banden met de experimentele fysica volledig door te snijden. Zo was hij een verklaard tegenstander van afzonderlijke tijdschriften voor theoretische fysica. Theoretische en experimentele fysica waren in zijn ogen complementaire delen van de moederdiscipline. Het propageren van een geheel eigen discipline zou haaks hebben gestaan op het heersende cultuurideaal. Duitse theoretici benadrukten maar al te graag de culturele dimensies en het synthetische karakter van hun werk; het doel van de fysica draaide om het verkrijgen van inzicht in de werkelijkheid. Overeenkomstig hiermee trachtte men een wereldbeeld te vinden dat simpel en elegant was, een synthese die bij voorkeur in woorden kon worden uitgedrukt. Wiskunde speelde hierin een secundaire rol en was geen doel op zich.

¹² Jungnickel en McCormmach, *Intellectual Mastery of Nature*, 33-58.

¹³ Jungnickel en McCormmach, *Intellectual Mastery of Nature*, 159-160.

Gebruik hiervan moest dan ook tot een minimum worden beperkt.¹⁴ Volgens Boltzmann was een theorie ‘zuiver een mentaal beeld van de fysische buitenwereld’¹⁵ een beeld dat samenhang gaf aan losse verschijnselen. De mechanismen van die beschrijving moeten daarbij niet met de realiteit worden verward; het zijn slechts ‘beelden’ of ‘analogieën’.¹⁶

Net voor de eeuwwisseling kreeg de ontwikkeling van de experimentele fysica een stimulans door de ontdekking van de Röntgenstralen, het elektron en de radioactiviteit.¹⁷ Door deze ontwikkelingen ontstond een sterkere neiging tot het verder uit elkaar trekken van theoretische en experimentele fysica – zo werd het geformuleerd door de Münchener hoogleraren die in 1890 voor Boltzmann lobbyden voor oprichting van een apart ordinariaat in de theoretische fysica. Hoewel er al een redelijk aantal extraordinariaten was geformeerd, had München met haar ordinariaat toentertijd bijna een primeur.¹⁸ Daarna werd de oprichting van ordinariaten herhaald om de hooggeachte Boltzmann naar Wenen (1893) en Leipzig (1900) te lokken, waarna hij in 1902 terugkeerde naar Wenen.¹⁹ De opkomst van de relativiteitstheorie in 1905, de quantumtheorie en de algemene relativiteitstheorie brachten de theoretische natuurkunde rond de Eerste Wereldoorlog tot bloei.²⁰ Voor de nieuwe discipline werden aan de Duitssprekende universiteiten nieuwe instituten opgericht en een groot aantal nieuwe ordinariaten ingesteld.²¹

¹⁴ Pyenson, *The young Einstein* (1985) 140-141, 162-166, 203; Boltzmann, ‘Josef Stefan’ (1925) 94. Zie ook: Jungnickel en McCormmach, *Intellectual Mastery of Nature*, 347.

¹⁵ Geciteerd in: Pyenson, *The young Einstein* (1985) 166.

¹⁶ Boltzmann, ‘Über die Methoden der theoretischen Physik’ [1892] (1925) 1-10. Zie voor de toepassing van Boltzmanns methode in diens onderwijs en onderzoek: Jungnickel en McCormmach, *Intellectual Mastery of Nature*, 154-157.

¹⁷ Jungnickel en McCormmach, *Intellectual Mastery of Nature*, 211-253; 125-148

¹⁸ Jungnickel en McCormmach, *Intellectual Mastery of Nature*, 150.

¹⁹ Jungnickel en McCormmach, *Intellectual Mastery of Nature*, 174-178, 184-192.

²⁰ Jungnickel en McCormmach, *Intellectual Mastery of Nature*, 159-160; 211-253.

²¹ Jungnickel en McCormmach, *Intellectual Mastery of Nature*, 254-347.

Specialisering en fragmentatie

Ook de eerste helft van de twintigste eeuw was getuige van een toenemende specialisatie. Zoals al eerder opgemerkt was specialisering niet iets wat doelbewust werd nagestreefd. Een aantal natuurwetenschappers had dan ook moeite met wat zij zagen als een steeds sterkere versplintering van hun vakgebied. Zo ook Ehrenfests vriend Arnold Berliner, die opmerkte dat de moderne natuurwetenschap ieder element van synthese leek te missen. Berliner was de drijvende kracht achter het invloedrijke tijdschrift *Die Naturwissenschaften*, dat in 1913 was opgericht als tegenwicht voor de effecten van de toenemende specialisatie in de natuurwetenschappen. Volgens Berliner maakte de 'rasch fortschreitende Spezialisierung' het steeds moeilijker om het ideaal, een 'Zusammenhang mit dem Ganzen', te behouden.²² In 1922 was Berliner nauw betrokken bij de oprichting en de redactie van de 'Ergebnisse der exakten Naturwissenschaften', een jaarlijks overzicht met artikelen op diverse gebieden van de natuurwetenschappen dat expliciet tot doel had de effecten van de specialisatie teniet te doen. Het gaf overzichten van diverse onderwerpen voor de niet-specialist.²³ In 1931 echter werden zelfs de overzichten voor sommigen, waaronder Berliner zelf, te complex. In een brief aan Ehrenfest klaagde Berliner dat hij depressief werd van zijn onvermogen om nog maar iets van de artikelen te begrijpen.²⁴ In 1932 juichte Einstein Berliners heroïsche pogingen toe om de negatieve effecten van de specialisatie te neutraliseren. Specialisering zorgde volgens Einstein voor een verlies van het overzicht op het 'geheel' van de wetenschap en voor een verslapping van de 'echte Forschergeist'.²⁵

Binnen de theoretische fysica zorgde vooral de opkomst van de quantummechanica voor een verdere specialisatie. Born merkte op dat de artikelen steeds ondoorzichtiger werden geschreven; bovendien was niemand meer in staat het hele onderzoeksveld te overzien.²⁶ Om in ieder geval enige structuur en helderheid binnen de quantummechanica te

²² [A. Berliner], 'Zur Einführung', *Naturwissenschaften* 1 (1913). Zie ook: Autrum, 'Arnold Berliner und die „Naturwissenschaften“' (1988) 1-4.

²³ 'Vorwort' (1922) ['sie sollen einen Überblick über die Sache geben, nicht über die Veröffentlichungen.']

²⁴ A. Berliner aan Ehrenfest, 9 juli 1931; APE ESC 1, sectie 3.

²⁵ Einstein, 'Zu Dr. Berliners siebzigstem Geburtstag' (1932) 913.

²⁶ Born aan Ehrenfest, 24 januari 1928, APE ESC 1, sectie 10.

scheppen, begon Born aan een ambitieus project om een uitgebreid leerboek te schrijven.²⁷ Zoals hij Ehrenfest schreef was alle hulp welkom bij deze immense klus. Born had niet de illusie dat hij het uitgebreide veld van de quantummechanica in zijn eentje kon overzien en beheersen, en riep Ehrenfest op hem te helpen. Ook Jordan en Pauli gaven regelmatig steun en raad, Wigner en Heitler schreven speciale paragrafen over groepentheorie en Von Neumann nam het wiskundige deel voor zijn rekening. Born trachtte ieder aspect van de theorie dat in het boek werd verwerkt zelf te begrijpen. Hij hoopte zo in staat te zijn de verstrooide informatie, die was vervat in een enorme hoeveelheid artikelen, tot een eenheid te smeden.²⁸ Daarbij moest de golfmechanica het veld ruimen; hoewel inzichtelijker dan de wel behandelde matrixmechanica vanwege de analogieën met de methoden van de klassieke mechanica, vergde het bespreken van de vele voorbeelden van toepassingen van de golfmechanica zeer veel ruimte. Het boek beoogde een helder overzicht te geven van de quantumtheorie en zocht een ‘wahre Verbindung zwischen klassischer und neuer Mechanik’ in het correspondentieprincipe van Bohr.²⁹

Wiskundigen uit Göttingen

In het boek van Born kreeg de wiskunde – die anders altijd bij elkaar moest worden geraapt uit wiskundeboeken – een apart hoofdstuk toebedeeld.³⁰ Dat was nodig, omdat wiskundige technieken die tot dan toe niet tot het standaardarsenaal van een fysicus behoorden, een steeds belangrijker rol begonnen te spelen in de theoretische natuurkunde.

Wiskundigen uit Göttingen hadden een grote invloed op de invoering van voor fysici nieuwe mathematische methoden. Felix Klein bepleitte in de jaren negentig van de negentiende eeuw al een grotere bemoeienis van wiskundigen met de natuurkunde en de techniek; dit om de praktische relevantie van hogere wiskunde zichtbaar te maken. Hij kreeg de Göttinger wiskundigen David Hilbert, Hermann Minkowski,

²⁷ Het boek werd gepubliceerd als: Born en Jordan, *Elementare Quantenmechanik* (1930).

²⁸ M. Born aan Ehrenfest, 24 januari 1928, APE ESC 1, sectie 10.

²⁹ Born en Jordan, *Elementare Quantenmechanik* (1930) v-viii.

³⁰ Born en Jordan, *Elementare Quantenmechanik* (1930) v-viii.

Hermann Weyl en Richard Courant hierin mee.³¹ Minkowski's wiskundige herformulering in 1908 van Einsteins theorie riep enthousiaste reacties op bij David Hilbert, die rond 1914 zijn programma startte om de natuurkunde met wiskundige formalismes te impregneren. Hilberts talentvolle student Hermann Weyl volgde dezelfde strategie.³² De invloedrijke Klein maakte van Göttingen een bolwerk waarbinnen de wiskundige aanpak van fysische problemen floreerde, en begon andere instituties daarin mee te krijgen. Rond 1914 was Aken een tweede Göttingen geworden.³³ Hilberts programma om wiskunde in andere gebieden toe te passen werd in geen geval gedreven door een streven naar wiskundige specialisering; voor hem was wiskunde een ondeelbaar geheel.³⁴ Ook Klein zelf, toch de drijvende kracht achter de nieuwe rol van de wiskunde binnen de fysica, beschouwde de wiskunde als een organisch geheel.

Desalniettemin begon er door de invloed van de wiskundigen binnen de theoretische fysica wel degelijk een tweedeling te ontstaan. Zowel middel als doel van het vakgebied begonnen de eerste veertig jaar van de twintigste eeuw door de wiskundige inmenging te veranderen. Langzaam maar zeker begon er zich een scheiding te vormen tussen wat de wetenschapshistoricus Seth heeft getypeerd als twee verschillende stijlen in de fysica: principegeoriënteerde fysica ('physics of principles') en de probleemgeoriënteerde fysica ('physics of problems').³⁵

Bij de principegeoriënteerde fysica ging het om de theoretische principes zelf, en het inzicht in de diepere aard van de werkelijkheid die deze ons konden verschaffen. Bij de probleemgeoriënteerde fysica waren de theoretische principes slechts hulpmiddelen om langs wiskundige weg experimenteel toetsbare resultaten te verkrijgen, waarbij consistentie en samenhang binnen de theorie er niet zoveel toe doen. Dit leidde tot tegenstellingen binnen de theoretische fysica; er ontstond een groeiende nadruk op resultaten, ten koste van de theorie zelf.

³¹ Pyenson, *The Young Einstein* (1985) 142-145, 178-183.

³² Pyenson, *The Young Einstein* (1985) 151-154, 183-184.

³³ Pyenson, *The Young Einstein* (1985) 182.

³⁴ Jungnickel en McCormmach, *Intellectual Mastery of Nature*, 335.

³⁵ Deze terminologie is afkomstig van: Seth, 'Crisis and the construction of modern theoretical physics' (2007) 41. De notie van het ontstaan van verschillende stijlen werd echter al eerder beschreven in: Pyenson, *The Young Einstein* (1985). Seth verwijst echter niet naar Pyenson als bron.

Poincaré, Planck, Einstein, Bohr³⁶, Lorentz, Boltzmann en Ehrenfest kunnen worden gerekend tot de meer principegeoriënteerde fysici. Kleins voormalige assistent en favoriete discipel Sommerfeld was een vroeg voorbeeld van de nieuwe kijk op theorieën. Sommerfeld ging vragen rond inzicht en samenhang uit de weg en hanteerde een soort ‘ingenieursaanpak’ binnen de fysica. Dat is niet vreemd, gezien het feit dat Sommerfeld voor zijn aanstelling in München zes jaar lang had gedoceerd op de technische hogeschool van Aken. Vanaf 1906 zou hij een groot deel van de jongere generatie theoretische fysici opleiden.³⁷

De wiskundige wending werd vooral beïnvloed door in Göttingen en München opgeleide quantumfysici. Deze hanteerden veelal een resultaatgerichte benadering van de problemen.³⁸ Sommerfeld, en Sommerfelds studenten Debye, Pauli en Heisenberg, lieten hun sporen na in de ontwikkelingen in de quantummechanica. In 1921 werd Hilberts voormalige assistent Max Born aangesteld als hoogleraar wiskundige fysica in Göttingen. Sommige ex-leerlingen van Sommerfeld, zoals Pauli, zouden later toch meer betekenis toekennen aan fysisch inzicht, een verschijnsel dat Born toedichtte aan de invloed van Bohr tijdens hun verblijf in Kopenhagen.³⁹

Al eerder merkten fysici de invloed van een toenemend wiskundige richting binnen de natuurkunde. Zo ook Planck, van 1906 tot en met 1918 redacteur voor de prestigieuze *Annalen der Physik*. De wiskunde die aan bod kwam in de artikelen in dit tijdschrift diende niet alleen relevant te zijn voor de fysische argumenten, maar diende voor alles ook helder te zijn.⁴⁰ Zoals Planck al merkte maakten wiskundigen steeds meer gebruik van geavanceerde wiskunde in hun bijdragen aan Einsteins speciale en algemene relativiteitstheorie.⁴¹ In 1916 schreef Einstein aan Ehrenfest over Hilberts behandeling van de relativiteitstheorie: ‘Sie ist unnötig speziell ... unnötig kompliziert, nicht ehrlich ... im Aufbau (Vorspiegelung des Übermenschen durch Verschleierung der Methoden).’⁴² We hebben in het vorige hoofdstuk al

³⁶ Seth, ‘Crisis and the construction of modern theoretical physics’ (2007) 41.

³⁷ Seth, ‘Crisis and the construction of modern theoretical physics’ (2007) 41-42; Pyenson, *The Young Einstein* (1985) 121.

³⁸ Pyenson, *The Young Einstein* (1985) 158-193.

³⁹ Seth, ‘Crisis and the construction of modern theoretical physics’ (2007) 43-44; Born, ‘Sommerfeld als Begründer einer Schule’ (1928) 1035-1036.

⁴⁰ Pyenson, *The Young Einstein* (1985) 203-208, m.n. 206.

⁴¹ Pyenson, *The Young Einstein* (1985) 183-188.

⁴² Einstein aan Ehrenfest, 24 mei 1916, EP 8A, doc. nr. 220.

gewezen op Sommerfelds initiële scepsis over het vernieuwende element in Ehrenfests adiabatiese hypothese. Ook Sommerfelds leerlingen Debye en Heisenberg hadden in de regel weinig op met Ehrenfests manier van werken. Dat was niet vreemd, aangezien Ehrenfest met zijn visie op de methodiek van de theoretische fysica nauw aansloot bij die van zijn leermeesters Boltzmann en Klein. Zowel in zijn onderwijs als in zijn onderzoek maakte hij gebruik van simpele fysische beelden en bijbehorende eenvoudige mathematische formuleringen.⁴³ Wat Ehrenfest een goede docent maakte, was zijn vermogen om lange berekeningen te omzeilen door een ingewikkeld probleem eerst terug te brengen naar de simpelste vorm, om pas daarna (eenvoudige) wiskunde toe te passen. Het was deze stijl van natuurkunde die Lorentz aantrok in het werk van Ehrenfest. Lorentz bedreef de fysica op een soortgelijke manier, hoewel Lorentz lange rekenpartijen zeker niet uit de weg ging.⁴⁴

Het is tekenend dat Ehrenfest de Leidse leerstoel in de wacht wist te slepen, ondanks zijn zelfverklaarde onkundigheid in het uitvoeren van ingewikkelde wiskundige berekeningen.⁴⁵ Nadat Ehrenfest de Leidse leerstoel had geaccepteerd, werd hij door Einstein geprezen als ‘einer der wenigen Theoretiker, denen die Mathematik-Seuche nicht den natürlichen Verstand geraubt hat!’⁴⁶ (Hoewel Einstein een zeer goede kennis van de wiskunde had, maakte hij zelf gebruik van elementaire wiskunde. Pas bij zijn uitwerking van de algemene relativiteitstheorie moest hij noodgedwongen de hulp van wiskundigen inroepen.⁴⁷)

Mathematisering

De algemene relativiteitstheorie en de quantummechanica zorgden voor een steeds verdere uitbreiding van het wiskundig instrumentarium. Kon

⁴³ A. Sommerfeld aan Lorentz, 24 april 1912, in: Eckert en Märker, *Arnold Sommerfeld: Wissenschaftliche Briefwechsel I* (2000) 417-418. Zie ook: P. Ehrenfest aan Tanja Ehrenfest, 17 november 1928, APE EPC 1, sectie 6. Hij verklaarde ook in deze brief dat dit mentale beeld in de weg stond van de abstractie van de wiskunde.

⁴⁴ Dit werd bijvoorbeeld opgemerkt door H.A. Kramers, zie: Casimir, *Haphazard Reality* (1983) 153.

⁴⁵ Ehrenfest aan A. Sommerfeld, 30 september 1911, in: Eckert en Märker, *Arnold Sommerfeld: Wissenschaftliche Briefwechsel I* (2000) doc. nr. 180.

⁴⁶ EP 5, doc. nr. 409.

⁴⁷ Jungnickel en McCormmach, *Intellectual Mastery of Nature*, 337-338.

een negentiende-eeuwse fysicus nog volstaan met enige vaardigheid in het oplossen van partiële differentiaalvergelijkingen, een twintigste-eeuwse theoretisch fysicus moest kennis hebben van vectoren, tensoren, spinoren, matrices, groepentheorie, Hilbertruimten enzovoort.

Ehrenfest zag met lede ogen aan hoe de fysica ‘mathematikastriert’ werd.⁴⁸ Volgens hem verwerd een natuurkunde die doortrokken was van complexe wiskunde tot een steriele vorm van wetenschap. Zijn leerlingen deelden deze zorg niet. In de jaren dertig van de twintigste eeuw spraken theoretisch fysici als Kramers en Casimir hun verbazing uit over de eenvoud van de mathematische methoden die door de wereldberoemde Lorentz amper twintig jaar eerder werden gebruikt.⁴⁹

Toen Heisenberg in Leiden voor het eerst zijn matrixmechanica uiteen kwam zetten, merkte Ehrenfest enthousiast op dat Heisenberg net als Newton niet alleen een nieuwe mechanica had uitgevonden, maar daarmee samenhangend ook een nieuwe wiskunde. De abstractheid van die wiskunde conflicteerde echter met Ehrenfests stijl, aldus diens student Uhlenbeck.⁵⁰ Ehrenfest moedigde Uhlenbeck aan zich de matrixrekening eigen te maken. Onder fysici werd Heisenbergs werk als een belangrijke stap voorwaarts gezien, maar het was moeilijk om er concrete resultaten uit af te leiden, en nog moeilijker om een voorstelbaar beeld van de door Heisenberg beschreven processen te vormen.⁵¹ Het jaar daarop verscheen Diracs niet minder esoterische quantumalgebra. Het kostte Ehrenfest veel moeite om Diracs werk in een begrijpelijke vorm te gieten. Toen hij dat had gedaan, was Planck verrukt dat het Ehrenfest was gelukt om ‘einer übersichtlichen anschaulichen Form’ van het werk van Dirac te geven. Voor Planck, die gewoon was ‘physikalisch bzw. Geometrisch zu denken’ was dat ‘unentbehrlich’.⁵² Datzelfde jaar, tot opluchting van veel oudere fysici, zag de toegankelijke en aanschouwelijke golfmechanica van Schrödinger het levenslicht. Al snel werden verbindingen gevonden

⁴⁸ Ehrenfest aan W. Pauli en P. Scherrer, 8 mei 1929, APE ESC 8, sectie 6.

⁴⁹ Casimir, *Haphazard reality* (1983) 153.

⁵⁰ Uhlenbeck, interview T.S. Kuhn, 9 december 1963, geciteerd in: Pais, *The genius of science* (2000) 294.

⁵¹ M&R 4, 232-233.

⁵² M. Planck aan Ehrenfest, 24 juli 1927, APE ESC 8, sectie 8.

tussen de twee zeer diverse formalismen van Heisenberg en Schrödinger.⁵³

In juni 1929 was de Amerikaanse fysicus John Slater een kruistocht begonnen tegen de onvoorstelbare ‘Gruppenpest’, zoals de in oktober 1927 geïntroduceerde groepentheorie wel werd genoemd. Slater ontwikkelde een eigen methode, gebaseerd op de golfmechanica van Schrödinger, waarbij ‘no mathematics other than the simplest is required’.⁵⁴ Slater meende dat juist op dat moment behoefte bestond aan fysici als Ehrenfest:

‘You regret your ignorance of what has happened in the last three years. I am amused but not sad. Because you know physics, and if some of the people who have been writing learned papers during those three years did likewise, things would be much better. The most useful people just now are those who refuse to comprehend the incomprehensible. It is so likely to be wrong.’⁵⁵

De groepentheorie bleek echter onverslaanbaar en claimde steeds meer successen binnen de theoretische fysica.⁵⁶

De vergelijking van de wiskunde met gecompliceerde, gevaarlijke machines en de hectiek van de grote stad was door Ehrenfest snel gemaakt:

‘Die Mathematik ist unmenschlich wie jede wirklich teuflische Maschine und sie tötet alle Menschen, die nicht rückenmarkmässiger zur Bewegung ihrer Räder passen. Auch auf

⁵³ Hoewel artikelen verschenen waarin werd beargumenteerd dat de twee theorieën in feite equivalent waren, had niemand de formele equivalentie van de twee methoden bewezen. Dat gebeurde pas in 1932. Zie: Muller, ‘The equivalence myth of quantum mechanics – part I’ (1997) 35-61; Muller, ‘The equivalence myth of quantum mechanics – part II’ (1997) 219-247; Muller, ‘The equivalence myth of quantum mechanics (Addendum)’ (1999) 543-545; Fysici waren al te opgelucht dat de matrixmechanica en de golfmechanica tot gelijke resultaten leidden, en omarmden het idee van een equivalentie tussen de twee formalismen met beide armen, waarbij ze voor het gemak vergaten dat deze aanname in wezen neerkwam op een ‘irrational act of faith’. Zie: Perovic, ‘Why were Matrix Mechanics and Wave Mechanics considered equivalent?’ (2008) 444-461, m.n. 446.

⁵⁴ M&R 6.1, 499-508; citaat op 504.

⁵⁵ J. Slater aan Ehrenfest, 3 december 1930; APE ESC 9, sectie 5.

⁵⁶ M&R 6.1, 509-523.

einer modernen Großstadtrasse werden alle Menschen überfahren, die Ihrer Großhirnrinde bedürfen um die „Verkehrsregeln“ anzuwenden.’⁵⁷

Ook de stap van moderne machines naar wapentuig lag voor de hand. Ehrenfest vergeleek de toepassing van nieuwe, gecompliceerde wiskunde met de ‘Verwendung von fürchterlichen mathematischen Canonen’.⁵⁸ Na een barrage van dat geschut ‘versperren uns [sonst] diese unbegrabenen Leichen mit ihren Mathematik-geschwollenen Bäuchen jedwede Aussicht. (Und dienen allem möglichen Gesindel überdies als Deckung)’ – opmerkingen die ontgezeglijk geïnspireerd waren door de gruwelen van de Eerste Wereldoorlog.⁵⁹

Ook ziekte en aftakeling waren een terugkerend thema in zijn brieven. Fysici werden geteisterd door een ‘mathematische Pest in die die ganze theoretisch-physikalische Literatur ertrunken ist.’⁶⁰ Het is tekenend dat Max Nordau’s ‘Entartung’ een van Ehrenfests favoriete boeken was.⁶¹ In zijn boek noemde Nordau diverse symptomen van de degeneratie van de moderne maatschappij, waaronder het antisemitisme.⁶² Ehrenfest nam de terminologie over en sprak van ‘Entartung’ met betrekking tot de door intellectuelen gevreesde degeneratie van de universiteiten.⁶³ Hij geloofde dat binnen de methode van de theoretische fysica een ‘Entartung’ of ‘Degeneration’ had ingezet.⁶⁴

Snelheid

Ehrenfest werd zelf geteisterd door depressies – of, in de terminologie van Ehrenfests held Nordau, door ‘neurasthenie’ –, zoals hij bijvoorbeeld in 1919 beschreef in een brief aan Einstein.⁶⁵ Ehrenfests depressies lijken

⁵⁷ Ehrenfest aan Tanja Ehrenfest, 17 november, 1928; APE EPC 1, sectie 6.

⁵⁸ Ehrenfest aan Tanja Ehrenfest, 24 september, 1928; APE EPC 1, sectie 6.

⁵⁹ Ehrenfest aan W. Pauli, 31 oktober 1932, APE ESC 8, sectie 6.

⁶⁰ Ehrenfest aan A.F. Joffe, APE ESC 6, sectie 1, 2 juni 1928.

⁶¹ Ehrenfest aan Hugo Ehrenfest, 27 februari 1930; APE EPC 1, sectie 7.

⁶² Nordau, *Degeneration* (Lincoln 1993, vertaling van de 2e Duitse editie) 209.

⁶³ Ehrenfest aan familie, 6 juli, 1930; APE EPC 1, sectie 8.

⁶⁴ Ehrenfest aan N. Bohr, 24 januari, 1930; APE ESC 1, sectie 8; Ehrenfest aan Schrödinger, 28 september, 1932; APE ESC 9, sectie 4.

⁶⁵ Ehrenfest aan Einstein, 9 december 1919, EP 9, doc. nr. 203.

vanaf midden jaren twintig zowel frequenter als heviger te worden. Bovendien verwees hij steeds vaker naar de nieuwe ontwikkelingen binnen de theoretische fysica als bron van zijn moeilijkheden. Naast ‘mathematisering’ vormde ‘snelheid’ een hoofdingrediënt van zijn zorgen.

De vernieuwingen binnen de theoretische fysica waren rond 1926 tamelijk hectisch. Tijdens de doorbraak van de nieuwe quantummechanica, tussen de zomer van 1925 en de lente van 1927 nam het publicatietempo dramatisch toe, met een verdubbeltijd van twee maanden.⁶⁶ Voor beoordeling was nauwelijks tijd en artikelen van hooggeschatte fysici werden vaak onmiddellijk gepubliceerd. Er ontstond een buitengewoon competitief klimaat, waarbij snelle publicatie een noodzakelijkheid werd, wilde men zijn concurrenten voorblijven. Condon sprak over het jaar 1926-1927 als een jaar waarin men intellectuele indigestie kreeg van de snelle ontwikkelingen.⁶⁷

Naast snelheid van publicatie was ook de snelheid waarmee nieuwe wiskundige technieken werden geïntroduceerd een bron van frustratie. Earle Kennard schreef hierover uit Göttingen: ‘Theoretical physics has reached a terrible state, new methods have to be learned every week, almost.’⁶⁸ Al snel kon Ehrenfest de wiskunde niet meer bijbenen. Ingewikkelde berekeningen besteedde hij altijd al uit (zie bijvoorbeeld Burgers’ werk aan het adiabatisch principe), maar vanaf 1925 voerden Ehrenfests studenten in toenemende mate de ingewikkelde berekeningen uit.⁶⁹ Bohr stopte rond die tijd met actieve, technische bijdragen aan de theoretische fysica; ook hij liet het technische gedeelte graag over aan assistenten.⁷⁰

Ehrenfest beklagde zich over de ‘explosieve en chaotische ontwikkeling’ van het vakgebied, die ervoor zorgde dat de zeer jonge fysici aan het front van het fysisch onderzoek terechtkwamen en de oudere fysici achterbleven. Ehrenfest zag de jonge fysici als in een tram voortsnellen, terwijl hij hen ‘als een astmatische tekkel’ achterna moest hollen.⁷¹ De periode 1925-1927 werd bekend als de jaren van de

⁶⁶ Kragh, *Quantum Generations* (1999) 168.

⁶⁷ Kragh, *Quantum Generations* (1999) 168.

⁶⁸ Geciteerd in: Kevles, *The physicists* (1979) 201.

⁶⁹ Uhlenbeck, interview T.S. Kuhn, 9 december 1963, geciteerd in: Pais, *The genius of science* (2000) 294.

⁷⁰ M&R 6.1, 75.

⁷¹ Ehrenfest aan Arthur Ehrenfest, 28 augustus 1928, APE EPC 1, sectie 6.

Knabenphysik.⁷² ‘Young boys of twenty-one lectured about original papers, revealing an amazing knowledge of modern physics.’⁷³

Respect en geduld met de oudere fysici kon door de jongeren nauwelijks worden opgebracht: ‘die jüngerer [können] kaum ein nachsichtiges Lächeln über die altmodische ... „Zurückgebliebenheit“ dieser Männer [Planck, Einstein, Schrödinger] unterdrücken’.⁷⁴ Ehrenfests student Casimir, behorend tot deze opstandige nieuwe generatie, erkende het *dédain* ten opzichte van de oudere fysici. De jongere fysici ‘waren geneigd om neer te kijken op iedereen die niet deze nieuwe leer had geabsorbeerd, of nog erger, tegen deze nieuwe leer protesteerde.’⁷⁵

De oudere fysici keken op hun beurt met argusogen naar de jongeren. Jonge fysici leken niet meer echt te weten waar ze het over hadden, en namen hun toevlucht tot halfbegrepen verklaringen, verkregen uit oppervlakkige gesprekken, brieven of ongepubliceerde artikelen – aldus Ehrenfest.⁷⁶

Born was het eens met Ehrenfests kritiek over de ‘publicatiedrift’.⁷⁷ Ook Planck bezag de moderne ontwikkelingen met argusogen, zo schreef hij in 1927 aan Ehrenfest. ‘Ich habe mich schon lange daran gewöhnt, Angesichts der rapiden Fortschritten auf dem Gebiet unserer Wissenschaft eine zurückhaltende Stellung einzunehmen [...]’⁷⁸ In 1932 biechtte Schrödinger op aan Ehrenfest buiten adem en depressief te zijn van zijn pogingen om de moderne ontwikkelingen bij te houden. Hij vergeleek de wiskundige en publicatiegerichte stijl van de jongere generatie met ‘eine hässliche Masturbation’.⁷⁹

Ehrenfest vergeleek het nonchalante en resultaatgerichte gebruik van ingewikkelde wiskunde met de pragmatische houding die hij bij veel

⁷² Pais, *The genius of science* (2000) 34-35.

⁷³ Infeld, *Quest* (1980) 173-174.

⁷⁴ Ehrenfest aan broers, 6 december 1929, APE EPC 1, sectie 7. Hij herhaalde dit in een brief aan N. Bohr, 24 januari 1930, APE ESC 1, sectie 8.

⁷⁵ Casimir, *Haphazard reality* (1983) 126.

⁷⁶ Ehrenfest aan Bohr, 24 januari 1930, APE ESC 1, sectie 8.

⁷⁷ M. Born aan Ehrenfest, 7 oktober 1928, APE ESC 1, sectie 10.

⁷⁸ M. Planck aan Ehrenfest, 13 mei 1927, APE ESC 8, sectie 8.

⁷⁹ E. Schrödinger aan Ehrenfest, 30 september 1932, APE ESC 9, sectie 4.

Hoewel Schrödinger in Wenen kwam studeren net na Boltzmanns dood, werd hij sterk gevormd door Boltzmanns leerling en opvolger Fritz Hasenöhl. Zie: Flamm, ‘Boltzmanns influence on Schrödinger’ (1987) 4-15.

Amerikaanse wetenschappers had opgemerkt.⁸⁰ Amerika was het land van de moderne industrialisatie dat door de wereld als voorbeeld werd genomen. Met ontzag had Ehrenfest de massaproductie gezien die in Amerikaanse fabrieken plaatsvond aan de lopende band. Amerikanen legden de nadruk in alles op de praktijk. In de Amerikaanse aanpak was geen ruimte voor diepere en fundamentele vragen.⁸¹ Natuurkunde was verworden tot een 'Fabrik', de sfeer in Berlijn was 'hyperamerikaniseerd', 'Und die Menschen merken gar nicht mehr, dass ihre Köpfe Telefonzentralen für Durchgabe und Neuverteilung sensationeller Physikberichte geworden sind.'⁸² In een brief aan Einstein klaagde hij over indigestie ten gevolge van het 'unendlicher Heisenberg-Born-Dirac-Schrödinger Wurstmachinen-Physik-Betrieb'.⁸³

Het industriële tempo, de specialisatie en de onduidelijke weergave in artikelen waren volgens Ehrenfest 'das Charakteristikum von Stagnations-Perioden!!!!'.⁸⁴ Ehrenfest zei slechts tot rust te kunnen komen bij gelijkgestemden als Bohr en Einstein; natuurkundigen die zich niet bezighielden met het 'fabriksmessigen "physikmachens"'.⁸⁵

Verlies aan aanschouwelijkheid en samenhang

Ten gevolge van de snelle ontwikkelingen en de mathematisering ging de aanschouwelijkheid en daarmee de begrijpelijkheid van de fysica voor veel oudere fysici verloren. De klassieke 'Anschaulichkeit' verdween naar de achtergrond, en werd meer en meer vervangen door ingewikkelde wiskundige berekeningen, waarbij geen acht werd geslagen op samenhang.⁸⁶ Die samenhang ontging de oudere fysici dan ook steeds meer – terwijl het de jongere fysici in het geheel niet meer om samenhang te doen was.

⁸⁰ Ehrenfest aan broers, 6 december, 1929; APE EPC 1, sectie 7.

⁸¹ Kragh, *Quantum Generations* (1999) 171-172.

⁸² Ehrenfest aan Bohr, 25 februari 1931; APE ESC 1, sectie 8; Ehrenfest aan broers, 6 december 1929; APE EPC 1, sectie 7.

⁸³ M&R 4, 278.

⁸⁴ Ehrenfest aan R.E. Peierls, 31 oktober 1932; ESC 8, sectie 7; Zie ook: Ehrenfest aan E. Schrödinger, 28 september 1932, APE ESC 9, sectie 4.

⁸⁵ Ehrenfest aan Bohr, 25 februari 1931, APE ESC 1, sectie 8.

⁸⁶ Miller, 'Visualization lost and regained: The genesis of the Quantum Theory in the period 1913-1927' (1978) 72-102.

Lorentz was één van diegenen die hun ongenoegen uitten over de moderne ontwikkelingen. Al in 1924 merkte een student op: ‘Lorentz treurt dat de physica niet meer klassiek is en scheidt weinig behagen in moderne dingen.’⁸⁷ Dat schreef Lorentz ook aan Ehrenfest:

‘Ik zou nu wel erg onvriendelijk zijn als ik niet eens wat van de “oude” physica ging vertellen; ik zal het trouwens graag doen. Men zal dan zien hoe gemakkelijkwij het vergeleken met nu, in die dagen hadden; er waren geen wolken (van quanta en dergelijke) en wij werkten onbekommerd en in blijden opgetogenheid. Bovendien waren er nog zooveel niet al te moeilijke vraagstukken dat men al licht een begin kon maken en een geschikten weg kon vinden.’⁸⁸

Lorentz kon geen enkele sympathie opbrengen voor de waarschijnlijkheidsinterpretatie van Schrödingers golfvergelijking. Hij voelde meer voor het vertrouwde beeld dat elektronen op ieder ogenblik een welbepaalde positie en snelheid bezaten. De huidige interpretatie was onmiskenbaar consistent, zo schreef Lorentz aan Ehrenfest, maar:

‘Toch gevoel ik weinig voor die opvatting van $\Psi\Psi^*$ als waarschijnlijkheid. Mij dunkt dat het ’t mooist zou zijn als men in de nieuwe mechanica wat meer van electronen die zekere plaats innemen, en zich op bepaalde wijzen bewegen, sprak.’⁸⁹

Als voorbereiding op het aanstaande Solvaycongres las Lorentz een stuk van Heisenberg, en berichtte hierover aan Ehrenfest:

‘De energie als matrix dat begrijp ik heel goed. Maar de tijd!’⁹⁰

Hij vroeg aan Ehrenfest om Heisenbergs werk snel in enkele woorden uit te leggen.

Volgens Ehrenfest was het vooral de met de quantummechanica gepaard gaande nieuwe stijl – doortrokken van wiskundige kunststukjes, met als doel meetbare resultaten en snelle publicatie – die een bedreiging

⁸⁷ D. Coster aan H.A. Kramers, 2 februari 1924, AHQP 8, sectie 4.

⁸⁸ Lorentz aan Ehrenfest, 20 juli 1923, APE ESC 7, sectie 7.

⁸⁹ Lorentz aan Ehrenfest, 29 augustus 1927, APE ESC 7, sectie 8.

⁹⁰ Lorentz aan Ehrenfest, 9 oktober 1927, APE ESC 7, sectie 8.

vormde voor het hele vakgebied. De nieuwe methode was hooggespecialiseerd en gaf aanleiding tot slordigheden, en was daarom slecht voor wat jonge experimentele fysici aan theoretische scholing meekregen.⁹¹

In zijn brieven viel Schrödinger Ehrenfest bij in zijn kritiek. Schrödinger klaagde bij Ehrenfest:

‘Die Physik wird in letzter Zeit so schrecklich schwer. Manchmal habe ich das Gefühl, ich verstehe gar nichts mehr. Bin ich so dumm oder ist es wirklich so, dass die Leute sich heutzutage nicht mehr Zeit nehmen, einem sauber und ordentlich auseinander zusetzen, was sie meinen. Bes[onders] Heisenberg und Dirac machen mir die allergrössten Schwierigkeiten. Und sind doch beide so grundgeniale Kerle, dass man einfach dazu kommen muss, sie zu verstehen!’⁹²

Ehrenfest voorzag dat fysici die de tijd namen om zaken eerst grondig door te denken, binnen de komende tien jaar verdwenen zouden zijn.⁹³ Hij zag het als een kwelling dat de jonge fysicus ‘auf solche fundamentale Fragen so schlecht Antworten zu geben lernt.’ Ehrenfest bezag dit als ‘Kulturlosigkeit’; een verlies van het al eerder genoemde synthetisch cultuurideaal binnen de fysische wetenschap.⁹⁴ Volgens Ehrenfest produceerde de nieuwe generatie natuurkundigen artikelen waar achter een wiskundig rookgordijn veel onduidelijkheden aanwezig bleven.

‘Aber als ich vor etwa einer Woche begann mir mehr im Detail durchzudenken, wie ich einige besonders interessante Punkte an möglichst ungelehrten Beispielen recht simpel deutlich machen müsste da bemerkte ich immer schärfer, dass hinter der großen Gelehrtheit der durch mich benützten Abhandlungen schrecklich viele bedenkliche Sachen verborgen sitzen.’⁹⁵

⁹¹ Ehrenfest aan Bohr, 24 januari 1930, APE ESC 1, sectie 8.

⁹² E. Schrödinger aan Ehrenfest, 5 mei 1927, APE ESC 9, sectie 4.

⁹³ Ehrenfest aan S.A. Goudsmit, 30 april 1928, APE ESC 4, sectie 10.

⁹⁴ Ehrenfest aan B.L. van der Waerden, 21 oktober 1928, APE ESC 10, sectie 6.

⁹⁵ Ehrenfest aan De Groot, 22 september 1928, APE ESC 5, sectie 2.

Ehrenfest had het ondertussen tot zijn missie verklaard om jonge fysici over de hele wereld duidelijk te maken dat ze niet echt begrepen wat ze aan het doen waren, ook al voerden ze allemaal met een ‘aapachtige behendigheid’ hetzelfde kunstje op.⁹⁶ Gefrustreerd betitelde Ehrenfest de virtuoze jongelingen als ‘Diese Klugscheisser!’⁹⁷ Als geen ander kon hij op spitsvondige wijze uiting geven aan zijn diepgevoelde ongenoegen. Toen hij in juni 1926 naar Göttingen toog, nam hij zijn papagaai mee, die hij had geleerd om de haverklap te roepen: ‘Aber meine Herren, das ist keine Physik!’ en die door Ehrenfest naar voren werd geschoven als voorzitter bij de komende discussies over de quantummechanica.⁹⁸

In Göttingen deelde Born Ehrenfests gevoelens. Born was een product van de Göttinger mathematische benadering, maar tevens een groot voorstander van het zoeken naar de diepere principes achter een theorie; zo suggereerde hij bijvoorbeeld in 1918 dat Planck of Einstein de Nobelprijs verdiende vanwege hun beider inspanningen om de grondslagen van de natuurkunde te verdiepen.⁹⁹ Als de methodologische dreiging niet werd tegengehouden zou de volgende generatie volledig ‘verschlamp’t zijn, schreef Born aan Ehrenfest.¹⁰⁰

Ook Schrödinger gaf bijval; volgens hem waren mensen als hijzelf en Ehrenfest de schatbewaarders van de werkelijke helderheid die hun door hun leermeesters Boltzmann en Lorentz was overgeleverd. Iets dat voor komende generaties in leven moest worden gehouden.¹⁰¹

Vorming van fysici

Om de effecten van de in zijn ogen te ver doorgeschoten mathematisering en fragmentatie te keren, probeerde Ehrenfest zijn eigen studenten in de eerste plaats te vormen als kritische geleerden.

⁹⁶ Ehrenfest aan Bohr, 24 januari, 1930, APE ESC 1, sectie 8.

⁹⁷ Uhlenbeck, interview T.S. Kuhn, 9 december 1963, geciteerd in: Pais, *The genius of science* (2000) 294.

⁹⁸ Ya.I. Frenkel aan zijn ouders, 30 mei 1926; geciteerd in: Frenkel, *Yakov Ilich Frenkel* (1996) 96.

⁹⁹ Seth, ‘Crisis and the construction of modern theoretical physics’ (2007) 43.

¹⁰⁰ M. Born aan Ehrenfest, 7 oktober 1928, APE ESC 1, sectie 10.

¹⁰¹ E. Schrödinger aan Ehrenfest, 30 september 1932, APE ESC 9, sectie 4. Hoewel Schrödinger in Wenen kwam studeren net na Boltzmanns dood, werd hij sterk gevormd door Boltzmanns leerling en opvolger Fritz Hasenöhr. Zie: Flamm, ‘Boltzmanns influence on Schrödinger’ (1987) 4-15.

Wiskundige virtuositeit werd niet als doel op zich nagestreefd, hoewel de wiskundige begaafdheid van een student wel werd bewonderd en benijd door Ehrenfest. In de eerste plaats werd het formuleren van heldere en kritische vragen gestimuleerd. Buitenlandse studenten kregen dezelfde behandeling. In oktober 1928 was Walter Elsasser te gast bij Ehrenfest. Volgens Ehrenfest eiste Elsasser ieder probleem voor zich op en probeerde hij dat onmiddellijk op te lossen met behulp van de allernieuwste wiskunde. Elsassers methode verwarde Ehrenfest, die zijn bezoeker vervolgens verbood de discussies tussen Ehrenfest en zijn studenten nog langer bij te wonen vanwege diens storende invloed.¹⁰² Born schreef eveneens onder Elsasser te lijden.¹⁰³

Tevens had Born moeite met de stijl van de wiskundig virtueuze Oppenheimer. Volgens Born was het te wijten aan Oppenheimers gebrek aan mentale discipline en zijn roekeloos najagen van ieder idee waarvan hij hoorde, dat het theoretisch onderzoek in Göttingen voor driekwart jaar was lamgelegd.¹⁰⁴

Ehrenfest wilde wel een poging doen om Oppenheimer mee te geven wat goed theoretisch onderzoek behoorde te zijn. In zijn uitnodiging aan Oppenheimer haalde Ehrenfest de talrijke gevallen aan waarin Oppenheimer 'sogleich mit einer Riesigen Rechenkanone' een vraag begon te beschieten, zonder er eerst eens ordentelijk over na te denken zoals Bohr, Einstein of Lorentz deden. Oppenheimer kreeg het advies rustig de tijd te nemen om een probleem te doordenken, en er daarna met Ehrenfest en zijn studenten over te discussiëren. Kwam er op deze wijze toevallig een resultaat uit dat gepubliceerd kon worden, dan was dat mooi meegenomen. Maar daar moest zeker niet meteen naar worden gezocht.¹⁰⁵ De nadruk lag altijd op het begrip en nooit op het zo snel mogelijk publiceren van een eigen artikel.¹⁰⁶

Deze nadruk had ook gevolgen voor de dissertaties die onder Ehrenfests supervisie werden geschreven. Een student moest in zijn dissertatie niet te veel streven naar de ontdekking van iets nieuws. Ehrenfest vroeg zijn studenten vaak de kern van pas verschenen

¹⁰² Ehrenfest aan M. Born, 21 januari 1928; APE ESC 1, sectie 10; Ehrenfest aan G.E. Uhlenbeck en S.A. Goudsmit, 11 april 1928; APE ESC 10, sectie 2.

¹⁰³ M. Born aan Ehrenfest, 24 januari 1928; APE ESC 1, sectie 10.

¹⁰⁴ M. Born aan Ehrenfest, 16 juli 1927; APE ESC 1, sectie 9; M. Born aan Ehrenfest, 24 januari 1928; APE ESC 1, sectie 10.

¹⁰⁵ Ehrenfest aan J.R. Oppenheimer, 5 juli 1928; APE ESC 8, sectie 2.

¹⁰⁶ Casimir, *Haphazard reality* (1983) 71.

artikelen van anderen bloot te leggen. Volgens hem moest er meer begrip ontstaan temidden van de hectische ontwikkelingen in de theoretische natuurkunde. Nieuwe ontdekkingen, gegoten in de vorm van ‘geleerde’ maar weinig doordachte proefschriften zouden slechts bijdragen aan de verwarring. ‘Ich hasse die hochgelehrte unlesbaren Dissertationen die „eine Krönung“ der Arbeit des betreffende jungen Menschen darstellen müssen. Ich habe gerne, dass eine Dissertation LUSTIGE, ermutigende (!!!!) Lecture für all die jüngeren Leute liefert. Dass sie zu den Originalabhandlungen anderer Autoren hinführt ohne sie ERSETZEN zu wollen.’¹⁰⁷ Waar Ehrenfests onderwijs zich richtte op een coherent beeld van de gehele fysica, zo moest een proefschrift op een bepaald gebied een synthese bewerkstelligen, en geen specialistisch betoog. Collega’s werden door Ehrenfest ook aangespoord om inleidende stukken te schrijven zodat andere fysici beter de moeilijke originele artikelen konden volgen.¹⁰⁸

Tot slot; de gevolgen

Hoewel Ehrenfest probeerde de nieuwe natuurkundestijl te stuiten, hadden zijn pogingen weinig succes. Buiten Leiden denderde de quantumtrein onverminderd voort. Met Ehrenfest als charismatisch leraar was Leiden een centrum geworden voor internationale uitwisseling van studenten en onderzoekers. Maar eind jaren twintig droogde de bezoekersstroom geleidelijk op. Jonge fysici zagen in dat ze naar andere plekken dienden te gaan, wilden ze het tempo van de nieuwe fysica bijhouden. En daarbij begon Ehrenfest potentiële gegadigden te ontmoedigen. De nieuwe ontwikkelingen begonnen Ehrenfest in dusdanige mate te ontgaan, dat hij bang werd om bezoekers onder ogen te komen. Wanneer buitenlandse studenten aangaven geïnteresseerd te zijn in een verblijf te Leiden, raadde Ehrenfest hen dat af en verwees hij hen door naar elders.¹⁰⁹

Ook Ehrenfests Leidse collega’s konden het tij niet keren. Fokker trachtte het waterstofatoom met spin te begrijpen. In zijn pogingen werd

¹⁰⁷ Ehrenfest aan N. Bohr, 24 januari 1930, ESC 1, sectie 8.

¹⁰⁸ Bijvoorbeeld: Ehrenfest aan S.J. Barnett, 7 november 1932, APE ESC 1, sectie 2.

¹⁰⁹ Hollestelle, ‘Paul Ehrenfests internationalisme. Bloei en verval van de Leidse theoretische fysica’ (2009).

hij gesteund door Ehrenfests assistenten Krans en Rutgers. Ondanks alle hulp moest hij erkennen dat het onderwerp hem te moeilijk was. Rutgers had net een baan als hoofdassistent en theoretisch adviseur geaccepteerd op het experimentele laboratorium van de Gemeentelijke Universiteit Amsterdam. 'Rutgers is ontmoedigd uit Amerika teruggekomen, twijfelende, of hij wel ooit iets van de moderne physica zou leeren begrijpen en ik was er niet geheel en al zeker van of de graagte, waarmede hij deze Amsterdamsche betrekking ambieerde, niet voor een deel was een vlucht voor de moeilijkheden van de quantumtheorie', aldus Fokker.¹¹⁰ Ehrenfests student Gerhard Dieke klaagde dat er te veel fysici actief waren. De snelheid waarmee de ontwikkelingen plaatsvonden resulteerde volgens hem in het gedwongen publiceren van artikelen die nog niet eens half af waren. Dieke dacht er serieus over na om de natuurkunde de rug toe te keren.¹¹¹

Bij zijn wanhopige pogingen om de natuurkunde te kunnen bijbenen consulteerde Ehrenfest zijn getalenteerde voormalige student H.A. Kramers – sinds 1926 hoogleraar theoretische natuurkunde te Utrecht. In 1927 lukte het Ehrenfest bijvoorbeeld maar niet om door te dringen in het werk van Dirac, Klein, Jordan en Pauli. Zijn studenten en assistenten konden hem ook niet ver genoeg helpen. Voor nadere uitleg toog hij naar Kramers.¹¹² Maar hij moest concluderen dat ook Kramers alleen maar gedeeltelijk wist te helpen.¹¹³ Ook Ehrenfests briljante student Casimir suggereerde dat theoretische fysica helemaal geen voortgang meer maakte. Hij speelde zelfs met de gedachte om de theorie te laten voor wat het was en experimenteel werk te gaan doen.¹¹⁴

Vanaf 1926 werden Ehrenfests problemen met de nieuwe quantummechanica zichtbaar in zijn publicaties.¹¹⁵ Terwijl iedereen druk bezig was om ingewikkelde teksten te publiceren dacht Ehrenfest na over de ondoordringbaarheid van materie, de grondslagen van de quantumstatistiek en het vangen van de quantummechanica in

¹¹⁰ A.D. Fokker aan Ehrenfest, 12 december 1930, APE ESC 4, sectie 5. Zie ook: A.J. Rutgers aan Ehrenfest, 21 oktober 1930, APE ESC 9, sectie 2.

¹¹¹ G. Dieke aan Ehrenfest, 2 november 1928, APE ESC 3, sectie 4.

¹¹² Ehrenfest aan Lorentz, 9 november 1927, APE ESC 7, sectie 9.

¹¹³ Ehrenfest aan Tanja Ehrenfest, 24 september 1928, APE EPC 1, sectie 6.

¹¹⁴ H.B.G. Casimir aan Ehrenfest, 10 oktober 1932; APE ESC 2, sectie 9.

¹¹⁵ Vanaf 1926 verschuift zijn stijl van meer creatief werk naar kritische bijdragen en grondslagenkwesties. Zie: CSP.

begrijpelijke beelden. Dat terwijl de natuurkunde het rijk van de voorstelbaarheid had verruild voor een meer abstract domein.

Ehrenfests worsteling met de nieuwe cultuur binnen de natuurkunde had implicaties voor zijn eigen werk. Ehrenfest liet zijn vrienden weten dat hij per 1 januari 1929 uit de Akademie zou treden. Hij moest al zijn energie aanwenden om te proberen de nieuwe fysica te volgen, terwijl zijn werkkraft juist sterk terugliep. En om het aanzien van de Nederlandse fysica hoog te houden was het beter als andere Nederlandse fysici het beperkt aantal Akademieplaatsen bezetten.¹¹⁶ Zeeman reageerde geschokt en hoopte Ehrenfest op andere gedachten te kunnen brengen.¹¹⁷ Blijkbaar is hem dat gelukt; de Akademie stelt in haar ledenlijst dat Ehrenfest tot aan zijn dood lid is gebleven.

Wel bemiddelde Ehrenfest tussen zijn vrienden Bohr en Einstein bij hun felle discussies over de quantummechanica. In 1932 riep hij de fysische gemeenschap op enkele brandende grondslagenkwesties op te lossen. Zijn werk toont zijn gedrevenheid om orde en eenheid aan te brengen binnen de quantumtheorie. Zoals we hebben gezien trachtte Pauli de vragen van Ehrenfest te beantwoorden, maar ook hij merkte in 1932 op dat de theorie op alle punten was vastgelopen; als vruchtbaar onderzoeksgebied kon men zich volgens hem op dat moment nog beter op de wiskunde richten.¹¹⁸

Niet lang daarna werd het duidelijk dat Slater had gecapituleerd onder de druk van de veranderende stijl binnen de fysica:

‘A theoretical physicist in these days asks just one thing of his theories: if he uses them to calculate the outcome of an experiment, the theoretical prediction must agree, within limits, with the result of the experiment. He does not ordinarily argue about philosophical implications of his theory ... Questions about a theory which do not affect its ability to predict experimental results correctly seem to me quibbles about words, rather than

¹¹⁶ Ehrenfest aan Tanja Ehrenfest, 24 september 1928, APE EPC 1, sectie 6; Ehrenfest aan F.A.F.C. Went, zonder nadere datum, 1928, APE ESC 10, sectie 7.

¹¹⁷ P. Zeeman aan Ehrenfest, 27 september 1928, APE ESC 10, sectie 9.

¹¹⁸ H.B.G. Casimir aan Ehrenfest, 10 oktober 1932, APE ESC 2, sectie 9.

anything more substantial, and I am quite content to leave such questions to those who derive some satisfaction from them.’¹¹⁹

Langzaam maar zeker werd consistentie en aanschouwelijkheid binnen de fysica steeds onbelangrijker; dit proces werd steeds moeilijker te stuiten naarmate meer fysici met deze opvattingen instemden.

Schrödinger bleef zich verzetten, en probeerde Ehrenfest een hart onder de riem te steken door te verhalen van diens onontbeerlijke rol in de natuurkundige gemeenschap, juist nu de chaos binnen de theoretische fysica zo groot was:

‘Die selbständigen Entdeckungen, die Laue oder Heisenberg oder Dirac, die Sie oder ich oder de Broglie gemacht haben, die hätte ... sicher ungefähr um dieselbe Zeit, vielleicht ein oder zwei Jahren später, ein anderer gemacht. Aber ich weiß Niemanden, der Sie hätte ersetzen können in Ihrer ständigen Funktion als gutes Gewissen unserer Wissenschaft, als Sokrates, den sein Daimonion nicht ruhen lässt, jede Sünde gegen den heiligen Geist des klaren und widerspruchslosen Denkens anzuklagen, unnachsichtlich bloßzustellen, aber doch mit so tiefem, echtem Wohlwollen gegen jeden schöpferischen Gedanken, dass Ihre Kritik nicht, wie meistens, destruktiv, sondern in eminentem Maasse fruchtbar und aufbauend wirkt.’¹²⁰

De maand daarvoor, in augustus 1932, had Einstein een brandbrief geschreven aan de secretaris van het curatorium van de Leidse universiteit. Hij maakte duidelijk dat Ehrenfest depressief was en zou spelen met de gedachte aan zelfmoord. Einstein pleitte voor de aanstelling van een tweede hoogleraar in de theoretische fysica om Ehrenfest te ontlasten, in ieder geval voor zolang de chaotische ontwikkeling binnen de theoretische fysica voortduurde. Hij wees erop dat de verdeling van taken tussen meerdere hoogleraren al gewoonte was binnen de experimentele natuurkunde.¹²¹ Het curatorium deed echter

¹¹⁹ J. Slater (1938), geciteerd in: Schweber, ‘The empiricist temper regnant’ (1986) 55-98, m.n. 66.

¹²⁰ E. Schrödinger aan Ehrenfest, 30 september 1932, APE ESC 9, sectie 4.

¹²¹ Van Lunteren, ‘Paul Ehrenfest: de Leidse onderzoekschool van een fysicus in diaspora’ (2003). Zie voor de inhoud van Einsteins brief: Idenburg, *De Leidse universiteit 1928-1946* (1978) 354-356.

niets en kon waarschijnlijk niets doen vanwege de crisis. Net 16 dagen voor Einsteins schrijven had Ehrenfest al zijn afscheidsbrief geschreven en in een gesloten envelop klaargelegd, maar nog een jaar lang vocht Ehrenfest tegen zijn depressie voor hij uiteindelijk op 25 september 1933 zelfmoord pleegde.

Uit zijn brief bleek dat de dramatische ontwikkelingen binnen de fysica een belangrijke reden voor zijn zelfmoord vormden.¹²² Ehrenfests dood markeerde tevens het einde van de oude onderzoeksstijl binnen de theoretische fysica. Einstein had zich al lang afgewend van het onderzoek aan de quantummechanica, en richtte zich op het vinden van een algemenere theorie die ook de quantummechanica zou omvatten, waarbij de onbegrijpelijke quantumeigenschappen zouden worden verklaard door begrijpelijke, causale processen. Schrödinger wendde zich gedesilluseerd tot de kleurentheorie en schreef later een belangwekkende studie over erfelijkheid. Bohr zonk dieper weg in filosofische bespiegelingen over de quantumconcepten en liet het echte werk allang over aan zijn assistenten.

Zoals Ehrenfest al had gesignaleerd, raakte de fysica steeds meer ‘geamericaniseerd’. Steeds vaker trokken jonge fysici naar de VS, en de fysica groeide er enorm snel. Dat proces werd nog eens versterkt toen in 1933 vrijwel alle joodse medewerkers aan de Duitse universiteiten en hogescholen werden ontslagen. Ehrenfests vriend Berliner werd uit de redactie van zijn eigen tijdschriften verwijderd, en pleegde in 1942 zelfmoord toen hij zelfs uit zijn appartement dreigde te worden gezet. Vele andere ontslagen fysici vonden in Amerika een nieuw thuis. Na de Tweede Wereldoorlog zouden de Verenigde Staten alle takken van natuurwetenschap domineren.

Voor hen die achterbleven zat er niets anders op dan te berusten in de veranderingen. In 1955 zou Pauli de jaren twintig en dertig karakteriseren als een ‘period of spiritual and human confusion’. Deze verwarring eindigde – aldus Pauli – toen men uiteindelijk aanvaardde dat het weergeven van theorieën in concrete mentale beelden – de ‘Anschaulichkeit’ in de natuurkunde – moest worden vervangen door

¹²² Ehrenfest aan Bohr, Einstein, Franck, Herglotz, Joffe, Kohnstamm, Tolman, 14 augustus 1932, geciteerd in: Pais, *Niels Bohr's Times* (1991) 409-410. Volgens Kohnstamm behoorde de brief na Ehrenfests dood te worden geopend: Kohnstamm, ‘Paul Ehrenfest als tolk van dezen tijd’ (1952) 425-434.

wiskundige abstracties.¹²³ Het is treffend dat juist Bohr zich herinnerde dat vele fysici in beroering waren door de EPR-paradox. Uhlenbeck – één van de jongere fysici – herinnerde zich echter weinig ophef. Het betrof een filosofisch probleem, dat veilig aan Bohr en Einstein kon worden overgelaten; het merendeel van de fysici ging ongestoord verder.¹²⁴ De probleemgeoriënteerde stijl – zoals onder anderen gepropageerd door Sommerfeld, en die door jongere fysici werd aangehangen – had de uitstervende, meer filosofische stijl van oudere fysici als Planck, Bohr, Einstein en Ehrenfest al lang achter zich gelaten.

¹²³ Pauli, *Niels Bohr and the development of physics* (1955) 30-31; zie hiervoor ook: Pyenson, *The Young Einstein* (1985) 153.

¹²⁴ Pais, *Niels Bohr's Times* (1991) 430.

Hoofdstuk 5

Zuivere wetenschap en praktisch nut¹

Menschen, die die Theorie völlig beherrschen, können für entstehende [praktische] Fragen eine Lösung angeben.²

Inleiding

Een lange, schommelschokkerige treinreis op harde derdeklas banken zorgde ervoor dat Ehrenfest op een bewolkte novemberdag in 1920 op het station van Eindhoven terecht kwam. Daar werd hij hoogstwaarschijnlijk door Gilles Holst verwelkomd – een getalenteerde oud-medewerker van Kamerlingh Onnes.

Zes jaar daarvoor was Holst de eerste directeur van het kersverse Natuurkundig Laboratorium (NatLab) van Philips geworden. Kamerlingh Onnes was *not amused* dat zijn veelbelovende assistent een grote zak met geld werd voorgehouden en zo werd weggekaapt uit zijn laboratorium. In de komende jaren zouden steeds meer assistenten en medewerkers uit Leiden naar het industriële natuurkundig laboratorium trekken. Volgens Onnes werd het hierdoor moeilijker assistenten te vinden.³

Ondanks Onnes' klaagzang was het uitgerekend zijn collega-fysicus Ehrenfest die nu naar het NatLab toog, en in een warmgestookt zaaltje aan een enthousiaste colloquiumvoordracht begon voor een nog kleine schare NatLab-medewerkers. Het was geen eenmalige actie, want in de archiefstukken valt te lezen dat Ehrenfest in twaalf jaar tijd bijna

¹ Gedeelten van dit hoofdstuk verschenen eerder in: Hollestelle, 'Zuivere praktijk. Paul Ehrenfests opvattingen over toegepaste natuurkunde' (2007) 53-65.

² Ehrenfest, geciteerd in: Kant, *Abram Fedorovič Ioffe* (1989) 58.

³ Van Delft, *Heike Kamerlingh Onnes* (2005) 320-321.

tachtig lezingen hield, en bovendien sprekers regelde voor talloze andere NatLab colloquia.⁴ In dit hoofdstuk zal ik beschrijven hoe Ehrenfest als theoretisch fysicus zo sterk betrokken raakte bij het laboratorium dat bij uitstek gericht was op praktisch onderzoek en welke invloed deze contacten hadden op zijn visie op wetenschap en maatschappij.

Allereerst zal ik het begrip 'zuivere wetenschap' onder de loep nemen. Veel vroeg twintigste-eeuwse natuurwetenschappers meenden dat wetenschap gepaard ging met tal van nuttige toepassingen, maar zij probeerden tegelijkertijd angstvallig vast te houden aan een 'science-pour-la-science'-mentaliteit. Ehrenfest deed dit in eerste instantie ook. Maar in de loop van de jaren twintig kreeg hij steeds meer sympathie voor het voorstel om zogenaamde 'toegepaste wetenschap' binnen het universitaire bestel een plaats te geven.

Zuivere wetenschap?

De universiteit was gedurende een groot deel van de negentiende eeuw in de eerste plaats een onderwijsinstelling waar vrijwel de gehele bestuurlijke en culturele elite werd opgeleid. Het nut van een wetenschappelijke opleiding was vooral gelegen in de 'academische vorming', ook wel 'wetenschappelijke' of 'algemene vorming' genoemd. Daarnaast hadden de natuurwetenschappen vooral een functie in het propedeutisch onderwijs voor toekomstige medici. Maar zeer weinig studenten stroomden binnen de academische natuurwetenschap door naar een doctoraalexamen en promotie.⁵

In 1815 kregen de natuurwetenschappen door de nieuwe wet op het hoger onderwijs een eigen volwaardige faculteit. Na 1863 ontstond er door de oprichting van de HBS en de hervorming van de gymnasia een toenemend beroepsperspectief voor de 'natuurfilosofen', met als gevolg dat de aantallen doctoraten sterk begonnen te stijgen. Bovendien kwam er na de nieuwe wet op het hoger onderwijs van 1876 meer geld ter beschikking voor personeel en laboratoria. Binnen het academische onderwijs kwam de nadruk steeds meer te liggen op

⁴ Philips Company Archive, NL330 en NL331.

⁵ Baneke, *Synthetisch denken* (2008) 46, 47, 61; Wachelder, 'Wetenschappelijke vorming' (1993) 9-26; Willink, *Burgerlijk sciëntisme* (1988); Baggen, *Vorming door wetenschap* (1998); Rupp, *Van oude en nieuwe universiteiten* (1997).

onderzoeksvaardigheden. Natuurwetenschap had niet langer alleen een algemeen vormende waarde voor de studenten. Onderwijs in de natuurwetenschappen werd tevens het opleiden van professionele onderzoekers, die onderzoek verrichtten dat primair gericht was op de vermeerdering van kennis.⁶ De toenemende nadruk op onderzoek en de afschaffing van de algemene propedeuse in 1876 hadden tot gevolg dat het aantal studierichtingen sterk toenam. De leeropdrachten van hoogleraren werden steeds specifiek. Wetenschappers specialiseerden zich steeds meer, richtten specialistische vaktijdschriften op en verenigden zich in aparte beroepsgroepen.⁷ De specialisering binnen de wetenschap had als gevolg dat het ideaal van de academische vorming in gevaar kwam. De opleiding tot zelfstandig denkend intellectueel diende volgens vele academici nog steeds de kern van de universitaire opleiding te zijn.⁸

Tegelijkertijd namen de beroepsmogelijkheden van afgestudeerde natuurwetenschappers en technici sterk toe, doordat de overheid en het bedrijfsleven een groeiende behoefte hadden aan hun expertise. Nadat de Polytechnische School te Delft in 1905 was omgevormd tot Technische Hogeschool bediende ze de industrie op haar wenken. Tegelijkertijd met de omzetting naar hogeschool verkreeg Delft het *ius promovendi* en stak zelfs de universiteiten naar de kroon. De Handelshoogeschool te Rotterdam en de Landbouwhogeschool Wageningen volgden enige jaren later. In 1917 werd bij wet geregeld dat leerlingen van de HBS tot de universiteiten mochten worden toegelaten. Veel wetenschappers hadden hiervoor gepleit, omdat HBS-leerlingen werden afgeschrikt door het voor hen wettelijk verplichte toelatingsexamen klassieke talen voor de universiteit – en zij dus in groten getale naar de hogescholen trokken.⁹ De grens tussen universiteit en hogeschool stond onder druk.

Academische wetenschappers reageerden op de groeiende wetenschappelijke ambities van de hogescholen met de redenering dat de hogescholen een andere wetenschap hanteerden dan de universiteiten, namelijk ‘toegepaste’ in plaats van ‘zuivere’ wetenschap. Wetenschappers wezen toegepast onderzoek niet af, maar benadrukten het primaat van de

⁶ Baneke, ‘Toegepaste natuurwetenschap aan de universiteit – contradictie of noodzaak?’ (2006) 29-38; Baneke, *Synthetisch denken* (2008) 46-67.

⁷ Baneke, *Synthetisch denken* (2008) 48.

⁸ Baneke, *Synthetisch denken* (2008) 61.

⁹ Baneke, *Synthetisch denken* (2008) 50.

‘zuivere wetenschap’ die aan de universiteiten werd bedreven, en waar toegepaste wetenschap slechts een afgeleide van was. Het door deze wetenschappers gehanteerde begrip ‘zuivere wetenschap’ kwam rond 1900 in zwang.¹⁰ Zoals de antropologe Mary Douglas heeft laten zien, zijn termen als ‘zuivere wetenschap’ geladen met diepere betekenissen.¹¹ ‘Zuiver’ impliceert dat alle andere soorten van wetenschap onzuiver, vervuild, zijn.¹² In diverse westerse landen werd in de negentiende eeuw het onderscheid zuiver-onzuiver benadrukt binnen uiteenlopende culturele domeinen.¹³ Douglas heeft aangetoond dat zuiverheidvoorschriften doorgaans nauw verband houden met de vrees voor verandering en overschrijding van getrokken grenzen.¹⁴ Zoals Baneke het puntig formuleert: ‘De universiteiten hadden belang bij een heldere taakverdeling: zuivere wetenschap op universiteiten en toegepaste wetenschap op hogescholen.’¹⁵ Om deze taakverdeling te onderstrepen en hun terrein opnieuw af te bakenen ten opzichte van de hogescholen werd het begrip ‘zuivere wetenschap’ ingezet.

Zo was Lorentz van mening dat zuiver wetenschappelijk onderzoek de kennisbasis vormde voor de vooruitgang en verbetering van de Westerse beschaving. Volgens hem was het de natuurkundige die de wetten opspoorde, welke de technicus kon toepassen. Hij pleitte dan ook voor een gedegen theoretische invulling van het onderwijs aan de technische hogescholen. De grens tussen opsporen en toepassen was echter niet scherp. Lorentz onderschreef daarom ook de ‘breede, zuiver wetenschappelijke grondslag’ waarop de Delftse technische opleidingen rustte.¹⁶ Hij zag zijn persoonlijke rol vrijwel zonder uitzondering in het aanleveren van ‘zuivere’ kennis.¹⁷

Veel hoogleraren waren dat met hem eens. De beoefening van zuivere wetenschap was een noodzakelijke voorwaarde voor eventuele toepassingsmogelijkheden. Aan de universiteiten nam in het interbellum het enthousiasme over toegepaste wetenschap desondanks toe. Dat hield

¹⁰ Kevles, *The physicists*, 45.

¹¹ Douglas, *Purity and danger* (1966)

¹² Kevles, *The physicists*, 45.

¹³ Labrie, *Het verlangen naar zuiverheid* (1994) 3-4, 11-12.

¹⁴ Labrie, *Het verlangen naar zuiverheid* (1994) 6; Douglas, *Purity and danger* (1966) 2.

¹⁵ Baneke, *Synthetisch denken* (2008) 61.

¹⁶ Theunissen en Klomp, ‘H.A. Lorentz’ visie op wetenschap’ (1998) m.n. 4-5.

¹⁷ Theunissen en Klomp, ‘H.A. Lorentz’ visie op wetenschap’ (1998) m.n. 4-5.

met een aantal zaken verband. Eén daarvan was de opkomst van de industriële laboratoria in binnen- en buitenland. Een aantal hoogleraren zocht in het interbellum nadrukkelijk toenadering tot de industrie.¹⁸ Daarmee speelden ze in op een aantal ontwikkelingen, zoals de snel stijgende kosten van het universitaire onderzoek en de behoefte aan een groter afzetgebied voor stijgende aantallen afgestudeerden. De industrie bood mogelijkheden om geld voor onderzoek te verkrijgen en kon afgestudeerden een baan bieden. Het maatschappelijk draagvlak voor het universitaire onderzoek kon bovendien worden verhoogd, wat winst betekende in de concurrentieslag met de hogescholen.

De Utrechtse botanicus Friedrich Went richtte zich net als Lorentz primair op het zuivere onderzoek. Maar Went zocht ook toenadering tot de Indische Proefstations, waar onderzoek werd gedaan ten behoeve van de tropische koloniale landbouw. Hij haalde relevante vakken binnen de universiteit door middel van privaatchapen en bijzondere leerstoelen, gefinancierd door het Indische bedrijfsleven. Utrecht werd zo hofleverancier van afgestudeerde biologen aan de proefstations, hoewel in Wageningen toepassingsgerichte landbouwkundigen werden opgeleid. Volgens Went konden deze wel als wetenschapsvoorlichters voor de landbouwers optreden, maar de echte wegbereiders voor de toepassing waren volgens hem de beoefenaars van de 'zuivere' wetenschap: mensen als Went en zijn studenten dus.¹⁹ Als voorzitter van de commissie-Went gaf hij in 1925 de aanzet tot de in 1930 opgerichte Nederlandsche Organisatie voor Toegepast Natuurwetenschappelijk Onderzoek (TNO). Deze organisatie had tot doel de samenwerking tussen industrie, universiteit en overheid in het toegepaste onderzoek te verbeteren. Hij bleef echter een warm pleitbezorger van een autonome, 'zuivere' wetenschapsbeoefening aan de universiteit.

De Utrechtse chemicus Hugo Kruyt had een soortgelijke visie op wetenschap en maatschappij. Zijn opvatting werd geschaagd door zijn socialistische sympathieën en een christelijke levensovertuiging. Hij meende dat de wetenschap nuttig kon zijn voor de industrie en dat ze kon bijdragen aan de oplossing van allerlei sociale problemen. In 1918 werd Kruyt voorzitter van de Nederlandsche Chemische Vereeniging.

¹⁸ Baneke, *Synthetisch denken* (2008) 49-60; Heijmans, Somsen, Huijnen, Homburg.

¹⁹ Van der Schoor, 'Biologie en landbouw. F.A.F.C. Went en de Indische proefstations' (1994) 145-161.

Nog datzelfde jaar gebruikte hij zijn functie om contacten te leggen met de chemische industrie. Hij riep op tot samenwerking tussen wetenschap en industrie, iets waaraan in zijn ogen grote behoefte bestond; na de oorlog zou de buitenlandse concurrentie immers weer aantrekken. Men moest volgens Kruyt een voorbeeld nemen aan Duitsland, waar fabrieken onderzoek financierden en ruime werkgelegenheid boden aan afgestudeerden. Het fundament voor de moderne, rationele industrie lag in de wetenschap. Kruyt liet binnen zijn laboratorium overigens alleen ‘zuiver’ wetenschappelijk werk toe.²⁰ Wel pleitte hij voor sterke toenadering tussen universiteiten en de maatschappij, zoals we verderop nog zullen zien.

NatLab colloquia

Zoals Kruyt al opmerkte was een nauwere samenwerking gewenst tussen universiteiten en het bedrijfsleven vanwege de nieuwe carrièremogelijkheden voor afgestudeerden bij het bedrijfsleven. Die mogelijkheden ontstonden vooral bij de industriële onderzoekslaboratoria die aan het begin van de twintigste eeuw in Nederland opkwamen.²¹

Met het Amerikaanse General Electric – kortweg GE – als lichtend voorbeeld, werd in 1914 het Philips Natuurkundig Laboratorium – NatLab – opgericht.²² Doel van het laboratorium was het leveren van bijdragen aan de ontwikkeling en verbetering van gloeilampen en elektronicaprodukten, gebaseerd op eigen patenten. Dat laatste was belangrijk; vóór 1910 was het in Nederland mogelijk zonder restricties gebruik te maken van buitenlandse technologie. Hierdoor stond Nederland internationaal als vrijbuiternatie te boek en werd het land met sancties bedreigd. In Nederland zou in 1910 als één van de laatste landen in Europa een octrooiwet in werking treden.

De eerste jaren was het NatLab een klein laboratorium. Zoals gezegd werd de eerste directeur Gilles Holst door Anton Philips bij

²⁰ Somsen, ‘Hooge School en Maatschappij. H.R. Kruyt en het ideaal van wetenschap en samenleving’ (1994) 162-176.

²¹ Voor een beeld van het soort en aantal industriële laboratoria, zie: Visser en Hakvoort, *Werkplaatsen van wetenschap en techniek* (1987)

²² De geschiedenis van het NatLab is uitgebreid beschreven in: Boersma, *Inventing structures* (2002); De Vries en Boersma, *80 years of research* (2005)

Kamerlingh Onnes weggekocht. Die wilde zijn laboratorium bevolken met competente fysici van goede reputatie. Het werk betaalde goed, maar het moest ook bevredigend genoeg zijn voor een academisch fysicus. Bovendien stond industrieel werk onder sommige hoogleraren slecht aangeschreven. Het was volgens Holst van belang een academisch klimaat te scheppen om jonge academici te kunnen motiveren voor werk in de industrie. Daar hoorde tevens bij dat de industriële onderzoekers een zekere vrijheid moest worden gelaten in hun onderzoekskeuze.

Het laboratorium stond begin jaren twintig aan de start van een explosieve groei. Om de NatLab-fysici bij te scholen nam Holst in 1920 Ehrenfest in de arm.²³ Ehrenfest verzorgde een reeks lezingen over de nieuwste ontwikkelingen in zijn expertisegebieden – de statistische fysica, de relativiteitstheorie en de quantummechanica. Hij sprak onder andere over diamagnetisme, het Zeemaneffect, en ook over de allernieuwste ontwikkelingen in de quantumtheorie.²⁴ Vanaf 1923 zien we ook andere grote namen als Lise Meitner, Niels Bohr, Arnold Sommerfeld, Max Born, James Franck, Otto Hahn, Irving Langmuir, Francis Aston en Frédéric Joliot spreken voor het NatLab-colloquium. In december 1923 was zelfs Einstein één van de sprekers. Veel van deze sprekers werden door Ehrenfest aangetrokken, die als ‘coördinator’ van het colloquium veelvuldig bezoekende collega’s strikte voor een voordracht op het NatLab.²⁵ Ook speelde hij de rol van wetenschappelijke tolk, omdat hij esoterische beschouwingen van minder begaafde sprekers altijd glashelder wist te maken. Toen Pauli naar het NatLab in Eindhoven kwam, werd Ehrenfest uitdrukkelijk gevraagd mee te komen. Zonder de deskundige leiding van Ehrenfest zou Pauli moeilijk te volgen zijn voor de andere wetenschappers.²⁶ De beroemde fysicus en latere Nobelprijswinnaar Gustav Hertz, destijds medewerker van het NatLab, prees de heldere colloquia van Ehrenfest, waarin de modernste inzichten duidelijk werden gemaakt.²⁷

Holst streefde ernaar aan het NatLab ook niet-toepassingsgericht wetenschappelijk onderzoek te laten verrichten. Dat hij in 1920 de Duitse natuurkundige Gustav Hertz overhaalde om voor vijftienduizend

²³ Boersma, *Inventing structures* (2002) 57, 39; De Vries en Boersma, *80 years of research* (2005) 33-58.

²⁴ Philips Company Archive, NL330 en NL331.

²⁵ De Vries en Boersma, *80 years of research* (2005) 33-58.

²⁶ De Groot aan Ehrenfest, 11 maart 1930, APE ESC 5, sectie 2.

²⁷ Boersma, *Inventing structures* (2002) 39.

gulden – ruim het dubbele van een hoogleraarsalaris – aan het NatLab te komen werken aan onderzoek naar gasontladingen, is hier een illustratie van. Volgens Holst zou onderzoek dat niet direct gericht was op toepassingen resulteren in onverwachte ontdekkingen, die weer konden leiden tot nieuwe uitvindingen.²⁸

Toen de fysicus Bart van der Pol een baan kreeg aangeboden aan het NatLab, besprak hij het aanbod met de Engelse fysicus Edward Appleton. In een brief noemde Van der Pol het werk dat aan het NatLab plaatsvond ‘zuivere wetenschap’. Van der Pol verwees naar Hertz, die voor het NatLab full-time werkte aan gasontladingen en in dat onderzoeksgebied ook nieuwe ontdekkingen deed. Het NatLab volgde daarbij het voorbeeld van General Electric, want zoals Van der Pol zei: ‘Working in this general scientific way already pays. They have the example of Langmuir.’²⁹ Irvin Langmuir verrichtte in die tijd baanbrekend fundamenteel werk voor GE, onder andere aan gasontladingen en elektronenemissie. Ook Langmuir was van mening dat industriële toepassingen voortkwamen uit experimenten die in de eerste plaats werden opgezet om de wetenschap zelf verder te brengen. Langmuir en zijn collega Whitney waren de eersten die zuiver wetenschappelijk onderzoek binnen de industrie propageerden. Niet alleen aan het NatLab werd in navolging van GE ingezet op industrieel onderzoek op fundamentele grondslag. In de jaren twintig volgden het Amerikaanse Du Pont en het Duitse IG Farben deze fundamentele benadering van het industriële onderzoek. Bekroning van deze werkwijze was de uitvinding van het nylon.³⁰

Dat met fundamenteel onderzoek praktische successen konden worden geboekt, werd aan het NatLab nog eens onderstreept door het werk van de chemici A.E. van Arkel en J.H. de Boer. Zij deden in de jaren twintig onderzoek naar metalen en andere vaste stoffen, waarbij ze op basis van de recente atoomtheorieën van Niels Bohr en Walther Kossel een theorie ontwikkelden waar eenvoudig empirisch mee te werken was. In 1930 werd deze theorie gepubliceerd in hun boek *Chemische binding als electrostatisch verschijnsel*. Dat was de start van een zeer vruchtbaar onderzoeksprogramma in de chemie van de vaste stof. Hun aanpak

²⁸ Boersma, *Inventing structures* (2002) 51-53.

²⁹ Van der Pol aan Appleton, 24 april 1922, geciteerd in: Boersma, ‘Structural ways to embed a research laboratory into the company’ (2003), 109-126, m.n. 118, 125n.

³⁰ Homburg, *Speuren op de tast* (2003) 31.

vormde een breuk met de tot dan toe gangbare descriptieve werkwijze van de Nederlandse anorganische chemie. De theorie van Van Arkel en De Boer had bijvoorbeeld een belangrijke invloed op het onderzoek dat door Philips werd uitgevoerd naar ferriet – een magnetiseerbaar keramisch materiaal dat gebruikt wordt in spoelen en transformatoren.³¹

Dat Ehrenfest bereid was de colloquia te houden, had diverse redenen. Wat zeker meespeelde was zijn sterke interesse in de techniek; twee van zijn broers waren ingenieur en zelf had hij aan de Technische Hochschule gestudeerd. Hij had een fascinatie voor uitvindingen.³² Als tijdverdrijf spendeerde hij menig uur op zolder aan het sleutelen aan zijn radio, waarbij hij dankbaar gebruik maakte van gekregen of geleende onderdelen van het Philips NatLab.³³ Ook het contact met zijn goede vriend, de Russische fysicus Joffe, droeg bij aan Ehrenfests belangstelling voor het NatLab. Joffe was in het interbellum de initiator van de sterke groei van de Russische fysica. De industrie van Rusland had voor de revolutie bijna geen contact met de Russische natuurwetenschap.³⁴ Na de Eerste Wereldoorlog ontwikkelde de industrie zich in hoog tempo en raakte Joffe overtuigd van de noodzaak van een nauwer verband tussen de studie van de natuurverschijnselen in de fysica en haar toepassingen in de techniek.³⁵ Op basis van zijn ervaringen in het buitenland pleitte Joffe voor reorganisatie van bedrijfslaboratoria en een nauwe band tussen deze laboratoria en universitaire onderzoeksinstituten.³⁶ Hij brak een lans voor het oprichten van een speciaal hiervoor toegespitst fysisch-technisch instituut. Van dit instituut zou hij later de eerste jaren de leiding hebben. Daarnaast bepleitte hij de oprichting van een fysisch-mechanische faculteit aan de Petersburgse polytechnische school, om studenten op te leiden in de toegepaste wetenschap. Die werd in 1919 inderdaad opgericht, met Joffe als hoofd.

Volgens Joffe had de natuurkunde een belangrijke invloed op het gebied van zowel de techniek als de industrie. Ook de theoretische

³¹ Van Arkel en De Boer, *Chemische binding als electrostatisch verschijnsel* (1930). Zie hierover: Homburg, *Speuren op de tast* (2003) 33.

³² Zie bijvoorbeeld: Klein, 'Osservando l'America: la visita di P. Ehrenfest negli USA' (1985) 9-24.

³³ Ehrenfest aan Van der Pol, 6 augustus 1925, 28 maart, 25 juli, 30 augustus 1927, 5 april 1928, APE ESC 8, sectie 8; Einstein, 'Nachruf Paul Ehrenfest' (1934) 96.

³⁴ Kant, *Abram Fedorovič Ioffe* (1989) 8-21.

³⁵ Kant, *Abram Fedorovič Ioffe* (1989) 39.

³⁶ Josephson, *Physics and politics in revolutionary Russia* (1991) 119-130.

natuurkunde kon volgens hem zo toch maatschappelijk toepasbaar zijn.³⁷ Voor een deel was dat retoriek. De theoretische wetenschap stond in de ogen van het Russische regime te ver van de praktijk af en was daardoor niet in staat tot bijdragen aan de industrialisatie. Vandaar dat de theoretische wetenschap eenvoudigweg dreigde te worden afgestoten., een gevaar dat Joffe trachtte te keren. Maar ook was Joffe het met Ehrenfest eens dat de kern van toepassingen moest worden gezocht in zuiver wetenschappelijk onderzoek.

Dank zij Ehrenfests vele Russische connecties kon hij het NatLab op de hoogte houden van de stand van zaken in de Russische natuurkunde en techniek. Zo meldde hij de komst van internationale bezoekers naar Leiden aan zijn NatLab collega's, zodat die hen van tevoren konden uitnodigen om ook een colloquium op het NatLab te komen geven.³⁸

Ehrenfest had overigens ook meer aardse redenen voor zijn belangstelling voor de NatLab-colloquia. In de nasleep van de oorlog en de Russische Revolutie hadden de Ehrenfests een klein kapitaal verloren aan Russische aandelen. De villa die zij in Leiden hadden laten bouwen was belast met een zware hypotheek. Later kwamen daar de rekeningen voor de verzorging van Vassily bij, wat de Ehrenfests jaarlijks zo'n 3000 Mark extra kostte.³⁹ Het is echter niet duidelijk of Vassily al in 1920 in de kliniek in Jena werd opgenomen. Hoe het ook zij, het is duidelijk dat Ehrenfest voortdurend om geld verlegen zat. Dat hij per voordracht van het NatLab honderd gulden plus reiskostenvergoeding betaald kreeg, was mooi meegenomen.⁴⁰ De meeste werkzaamheden die Ehrenfest moest uitvoeren om bij te verdienen, zoals het geven van populaire lezingen, werden naar eigen zeggen door hem verfoeid.⁴¹ Over het NatLab colloquium heeft Ehrenfest zich echter nooit beklagd; hij deed dit met veel enthousiasme.

³⁷ Kant, *Abram Fedorovič Ioffe* (1989) 52-53.

³⁸ Zie bijvoorbeeld: De Groot aan E. Fermi, 8 december 1931, APE ESC 4, sectie 2; Ehrenfest aan N. Papalexii, 8 november 1932, APE ESC 8, sectie 6.

³⁹ Ehrenfest aan P. Kapitza, 25 april 1933, APE ESC 6, sectie 4; Nota van Trüpers Erziehungsheime und Jugendsanatorium Sophienhöhe, Jena, 1 december 1928, APE EPC 4, sectie 10.

⁴⁰ Philips Company Archive, NL330 Colloquia correspondentie 1926-1938.

⁴¹ Ehrenfest aan Lorentz, 25 mei 1927, APE ESC 7, sectie 8.

Een reis naar de VS

Het tamelijk vrije onderzoeksklimaat op het Natlab moet zeker hebben bijgedragen aan Ehrenfests bereidheid om de colloquia te verzorgen. Ook Ehrenfest plaatste de 'zuivere' wetenschap boven de toepassing. Universiteiten moesten zich volgens hem verre van toepassingsgericht werk houden. Zijn uitgesproken mening hierover veranderde echter tijdens een reis naar de Verenigde Staten.

De Verenigde Staten liepen aan het begin van de twintigste eeuw achter op het gebied van de theoretische fysica en probeerden uit alle macht deze achterstand in te halen. Ehrenfest was een van de vele onderzoekers die na de Eerste Wereldoorlog naar Amerika werden gehaald voor het geven van colleges en lezingen.⁴² In december 1923 vertrok hij voor vijf maanden naar het California Institute of Technology, waar hij was uitgenodigd als gastonderzoeker. Het bezoek bood hem tevens de mogelijkheid om zijn oudere broer Hugo, die naar de Verenigde Staten was geëmigreerd, te bezoeken. Wederom waren de bijkomende inkomsten een extra motivatie; Ehrenfest kreeg alle onkosten vergoed, plus een bezoldiging van zeshonderd dollar per maand.⁴³ Het vooruitzicht van een weerzien met zijn broer en de royale vergoeding maakten het besluit om naar Amerika af te reizen niet al te moeilijk. In de VS wilde hij graag over fundamentele vragen in de quantumtheorie spreken. Daarover voelde hij zich het meest zeker en bovendien hadden Amerikaanse fysici een achterstand op dit onderzoeksgebied, zodat hij zich aldus nuttig zou kunnen maken.

In Amerika aangekomen merkte Ehrenfest al snel op dat het onderwijs aan de Amerikaanse universiteiten sterk gericht was op praktisch nut. Aanvankelijk probeerde hij zijn Amerikaanse collega's te overtuigen van de tekortkomingen van deze praktische oriëntatie, maar – zo schreef hij aan zijn vrouw – langzamerhand raakte hij onder de indruk van de mate waarin onderzoek en onderwijs waren toegespitst op de sociale behoeften.⁴⁴ Bovendien raakte hij gecharmeerd van de carrièremogelijkheden die de nauwe verwevenheid met de maatschappij

⁴² Overigens begonnen de Amerikanen al voor de Eerste Wereldoorlog met het uitnodigen van grote aantallen wetenschappers, onder andere uit Nederland. Zie: Van Berkel, 'Amerikanisering van de Nederlandse Universiteit?' (1989).

⁴³ Millikan aan Ehrenfest, 22 juni 1922; 3 oktober 1922, APE ESC 8, sectie 1.

⁴⁴ Ehrenfest aan Tatyana Ehrenfest, 30 december 1923, in: Klein, 'Osservando l'America: la visita di P. Ehrenfest negli USA' (1985) 9–24.

aan de studenten bood. Ehrenfest voorspelde zelfs dat dit land de natuurkundige prestaties van Europa in de toekomst niet alleen zou evenaren, maar zelfs zou overtreffen. Hoewel de ‘zuivere wetenschap’ nog tot volle wasdom moest komen, zou dit zeker gaan gebeuren, terwijl het succes van de wetenschap in Europa juist zou afnemen, aldus Ehrenfest.⁴⁵ Dat gevoel werd door andere wetenschappers gedeeld. Ook Kruyt had na een bezoek aan de VS in 1923 gewaarschuwd voor de leidende rol die Amerika zou gaan spelen als het zuiver wetenschappelijk onderzoek daar eenmaal van de grond zou komen.⁴⁶

Ehrenfest bezocht in februari 1924 als een van de eerste Nederlanders het onderzoekslaboratorium van General Electric, nog voor Holst, Van der Pol en Anton Philips dit deden. Hij was overdonderd door de grootse aanpak bij General Electric. Volgens eigen zeggen leerde hij hier de ‘sense and value of industrial research’ kennen.⁴⁷ Wat hem vooral aansprak was de nadruk die General Electric op wetenschap in haar zuiverste vorm bleef leggen.⁴⁸

Ehrenfest was onder de indruk van zijn Amerikaanse ervaringen maar niet bekeerd tot hun praktische invulling van het hoger onderwijs. In 1924, kort na zijn reis naar de VS, bezocht hij Rusland. Over de manier waarop de wetenschap moest worden opgebouwd hield hij een toespraak, waarvan de kern in de krant werd vermeld. Hij pleitte hierin voor een andere opzet van het Russische hoger onderwijs, niet alleen gericht op praktisch nut, maar ook op theoretische – lees zuivere – wetenschap. Ehrenfest verdedigde hiermee Holsts visie dat praktische oplossingen juist werden gevonden door zuiver onderzoek. Zo zei hij:

Jetzt jedoch schaue ich mit einiger sorge auf die Zukunft der russischen Physik. Mich beunruhigt hauptsächlich das Bestreben, ihr eine rein praktische Ausrichtung zu geben. Aus diesem Anlaß verweise ich auf folgendes; Während meines Aufenthaltes in Amerika fragte man mich dort, auf welche Weise man in Deutschland und Holland (wo ich arbeite) so schnell und in

⁴⁵ Ehrenfest aan Tatyana Ehrenfest, 30 december 1923, in: Klein, ‘Osservando l’America: la visita di P. Ehrenfest negli USA’ (1985) 9-24.

⁴⁶ Somsen, ‘Hooge School en Maatschappij. H.R. Kruyt en het ideaal van wetenschap en samenleving’ (1994) 162-176, m.n. 168.

⁴⁷ Boersma, *Inventing structures* (2002) 196.

⁴⁸ Ehrenfest aan Whitney, 14 april 1927, geciteerd in: Wise, *Willis R. Whitney* (1985) 234.

vielen Fällen so genial auf viele praktische Erfordernisse eine Antwort findet... Darauf konnte ich natürlich nur antworten, dass dies eine Folge der Achtung sei, die man in diesen Ländern der Entwicklung des rein theoretischen Wissens und an erster Stelle der Mathematik entgegenbringe. Menschen, die die Theorie völlig beherrschen, können für entstehende Fragen eine Lösung angeben. Deshalb lassen Sie mich hoffen, dass man in Sowjetrußland auf dem Wege einer harmonischen Entwicklung beider Richtungen, der rein theoretischen wie der praktischen, fortschreiten wird.⁴⁹

Volgens Ehrenfest moest zuivere wetenschap altijd als basis dienen voor eventueel toegepast wetenschappelijk onderzoek. Ook zijn eigen activiteiten op het vlak van de mathematische economie gingen primair uit van de zuivere wetenschap, zoals we ook in het volgende hoofdstuk zullen zien. Hij moedigde de ontwikkeling van Joffes instituten aan, waar zuivere en toegepaste wetenschap volgens Ehrenfest zich gezamenlijk moesten kunnen ontwikkelen. Aan het NatLab had hij het succes van deze aanpak gezien.

Onder meer door bezoeken aan het NatLab, GE en Westinghouse, raakte Joffe halverwege de jaren twintig overtuigd dat opleiding, onderzoek en productie een symbiotische relatie konden aangaan binnen het Polytechnisch Instituut te Leningrad. Hij wist verregaande steun van de overheid te verkrijgen, waarna hij in hoog tempo allerlei technische instituten opbouwde. Deze ontwikkeling kwam mede tot stand door de ruggesteun van Ehrenfest die in Rusland kwam pleiten voor de technische instituten.⁵⁰

Gesprekken met een goede vriend, de Groningse chemicus H.J. Backer, zullen mede van invloed zijn geweest op de omslag binnen Ehrenfests denken over zuivere wetenschap en praktisch nut. Volgens Backer bestond er helemaal geen fundamenteel onderscheid tussen zuivere en praktische wetenschap. Hij had goede contacten met het bedrijfsleven, waardoor hij studenten aan een baan kon helpen.⁵¹ Vooral dat laatste werd in de jaren twintig en dertig – toen de crisis toesloeg –

⁴⁹ Ehrenfest, geciteerd in: Kant, *Abram Fedorovič Ioffe* (1989) 58.

⁵⁰ Kant, *Abram Fedorovič Ioffe* (1989) 59-60; Josephson, *Physics and politics in revolutionary Russia* (1991) 116.

⁵¹ Baneke, *De Groningse eeuw van de natuurwetenschappen* (2005) 34-35; D. Baneke, *Synthetisch denken* (2008) 57.

steeds belangrijker. Backer huldigde hiermee dezelfde visie als Felix Klein, de beroemde wiskundige bij wie Ehrenfest in Göttingen had gestudeerd. Klein begon halverwege het laatste decennium van de negentiende eeuw met een programma om natuurkundige en technische problemen langs wiskundige weg op te lossen. Hij kreeg kritiek van collega's die vreesden dat een te sterke nadruk op toegepaste wiskunde de zuivere wiskunde bedreigde.⁵² Hoogleraren die te veel gericht waren op praktisch nut en het indienen van patenten werden door collega's bekritiseerd.⁵³ Klein zorgde er echter voor dat de zuivere wiskunde flink werd uitgebreid, en introduceerde tegelijkertijd technische opleidingsmogelijkheden in Göttingen.⁵⁴ De basis van het programma lag volgens Klein nog altijd in de zuivere wiskunde, die in Göttingen bloeide als nergens anders.

In 1893 had Klein al een bezoek gebracht aan de VS, waar hij onder de indruk was geraakt van de manier waarop industriëlen het hoger onderwijs steunden. Bij terugkomst in Göttingen richtte hij een associatie op ter bevordering van toegepaste fysica en wiskunde. Dit was een vereniging van industriëlen en hoogleraren.⁵⁵ Hij verzette zich tegen de toenemende trend om zuivere en toegepaste wiskunde van elkaar te scheiden. Klein zorgde ervoor dat de afdeling voor technische fysica in 1905 een onafhankelijk instituut voor toegepaste wiskunde en mechanica werd.⁵⁶

Ehrenfests ervaringen in Amerika, Rusland en met het NatLab begonnen op hun plaats te vallen, en zijn visie op hoe het hoger onderwijs eruit moest zien begon te veranderen. Ehrenfest begon sympathie te krijgen voor het idee om ook toegepaste wetenschap bij de universiteiten onder te brengen.

Toegepaste fysica aan de universiteit

Het contact tussen NatLab en Ehrenfest was zeker niet uniek in

⁵² Pyenson, *The young Einstein* (1985) 178-180.

⁵³ Kevles, *The physicists*, 45; In Duitsland was het verlangen naar zuiverheid op alle culturele vlakken het sterkst. Zie: Labrie, *Het verlangen naar zuiverheid* (1994) 3-4, 11-12.

⁵⁴ Pyenson, *The young Einstein* (1985) 178-180.

⁵⁵ Pyenson, *The young Einstein* (1985) 181.

⁵⁶ Pyenson, *The young Einstein* (1985) 216-217.

Nederland. Veel grote bedrijven werkten samen met hoogleraren. Het gaat hier om een twintigtal namen, onder wie de scheikundigen Backer en H.R. Kruyt, en de natuurkundigen L.S. Ornstein en A.M.J.F. Michels.⁵⁷ Maar hoewel zij in de regel aanvankelijk geen toegepast onderzoek duldden aan de universiteit zelf, begon dat in het interbellum te veranderen.

De Utrechtse natuurkundige Ornstein meende net als zijn collega's dat aan de universiteit de beoefening van de 'zuivere' wetenschap moest worden nagestreefd. Deze zou vroeg of laat vanzelf leiden tot toepassing in de maatschappij. Maar hij heeft ook op grote schaal toegepast wetenschappelijk onderzoek laten uitvoeren in zijn laboratorium, veelal op verzoek van het bedrijfsleven. Aan de Gemeentelijke Universiteit van Amsterdam werkte de fysicus A.M.J.F. Michels vruchtbaar samen met het bedrijfsleven. Hij ontving vanaf 1928 financiële steun van het Engelse Imperial Chemical Industries (ICI). Binnen zijn laboratorium werden onderzoekers voor ICI opgeleid en werden in opdracht van het bedrijfsleven instrumenten geïjkt. Daarnaast fungeerde hij als adviseur voor ICI. Michels maakte net als Ornstein handig gebruik van de al in het lab aanwezige expertise. Maar hoewel Ornstein naam maakte met zijn toegepast onderzoek, ontkende Michels met klem enig onderzoek in opdracht te verrichten. Hij benadrukte dat hij enkel 'zuiver' wetenschappelijk onderzoek uitvoerde. In werkelijkheid werd de afdeling van Michels in de jaren dertig overspoeld met opdrachten. Dat Michels nadrukkelijk afstand nam van enige associatie met onderzoek in opdracht, kwam omdat zijn werk nogal wat weerstand ondervond aan de universiteit. Hem werd verweten dat hij te 'technisch' en te weinig zuiver georiënteerd was. Enige associatie met opdrachtonderzoek zou dat verwijt alleen maar versterken.⁵⁸ Daarbij moet worden opgemerkt dat Ornstein het toegepaste onderzoek binnen het laboratorium angstvallig gescheiden hield van het zuiver wetenschappelijke onderzoek.

Ornsteins officiële verklaring voor het toegepaste onderzoek dat hij verrichtte was dat de natuurkundige volgens hem midden in de

⁵⁷ Homburg, *Speuren op de tast* (2003) 25; Baggen e.a., 'Opkomst van een kennismaatschappij' (2003), 141-173, m.n. 160-165.

⁵⁸ Zie: Maas, 'Atomisme en individualisme' (2001), 181-182, 185-189; Knegtmans, 'Onderwijs, wetenschap en particulier initiatief aan de Universiteit van Amsterdam, 1920-1950' (2000) 79-105, m.n. 83-90. Met dank aan P.J. Knegtmans voor deze informatie en de verwijzingen.

maatschappij moest staan en de plicht had de maatschappij te dienen. Natuurkundige wetten leverden volgens hem de basis voor praktische toepassingen, en praktische problemen konden aanleiding geven tot nieuwe natuurkundige inzichten. Ornstein sloot met deze filosofie naadloos aan op die van Holsts NatLab. Het lijkt erop dat Ornstein zelf ook in zijn eigen verklaring geloofde. Maar Ornsteins pleidooi voor samenwerking tussen wetenschap en industrie leverde ook wat op, namelijk een groot aantal opdrachten van het bedrijfsleven. Dat betekende extra geld en extra mensen, waardoor capabele onderzoekers voor langere tijd aan de universiteit verbonden konden blijven. Bovendien konden zijn studenten later ook bij het bedrijfsleven terecht. Utrecht werd zo hofleverancier van studenten aan het NatLab. In de jaren dertig kreeg het scheppen van extra arbeidsmogelijkheden binnen de industrie extra urgentie doordat de werkloosheid onder academici ernstige vormen ging aannemen. Het lot van zijn studenten ging Ornstein na aan het hart.⁵⁹

Maar er waren kapers op de kust. In 1905 was de polytechnische school te Delft al omgevormd tot Technische Hoogeschool en had daarmee het *ius promovendi* verkregen. Dit betekende een formele erkenning van het wetenschappelijke karakter van de opleiding. De daar opgeleide ingenieurs waren zeer gewild binnen de opkomende industriële laboratoria.⁶⁰ Hun positie werd nog eens verstevigd toen in 1928 te Delft het diploma voor natuurkundig ingenieur werd ingesteld – om tegemoet te komen aan de eisen die de onderzoekslaboratoria stelden. Dat had wel wat voeten in de aarde. W.J. de Haas – secretaris van de faculteit Algemene Wetenschappen van de TH Delft – pleitte samen met L.H. Siertsema al in 1922 bij curatoren van de hogeschool voor een cursus toegepaste natuurkunde. De aldus opgeleide ingenieurs zouden zich niet alleen nuttig kunnen maken bij Heemaf, Stork en Philips, maar ook bij Rijkswaterstaat en andere nationale departementen. Ook Philips pleitte bij de minister voor een zodanige cursus, net als Lorentz, de voorzitter van de afdeling voor hoger onderwijs binnen de Onderwijsraad, die de minister adviseerde een dergelijke cursus te starten.

Ornstein zag zijn positie en die van zijn studenten bedreigd en

⁵⁹ Heijmans, 'Wetenschap en industrie. L.S. Ornsteins opvattingen over toegepaste natuurkunde' (1994) 177-190, m.n. 177-186.

⁶⁰ Baneke, *Synthetisch denken* (2008) 78-97; Baneke, 'Toegepaste natuurwetenschap aan de universiteit – contradictie of noodzaak?' (2006) 29-38, m.n. 30-31.

stuurde een brief met negatief advies naar de minister. Hij nam samen met M. de Haas, H.B. Dorgelo en W.J. de Haas zitting in een door de overheid ingestelde commissie om de opzet van de nieuwe Delftse cursus te onderzoeken. Hij kon echter niet verhinderen dat de commissie een positief advies uitbracht aan de minister.⁶¹ Ornstein motiveerde zijn afwijzende houding met het argument dat een goede, zuiver wetenschappelijke opleiding alleen gegeven kon worden aan de universiteit. De daar opgeleide natuurkundigen waren bruikbaar dan de Delftenaren, want een zuivere wetenschapper kon nu eenmaal wel de technische mores leren, maar een ingenieur niet de wetenschappelijke denkmethode – die kon volgens Ornstein alleen aan de universiteit worden geleerd.⁶²

Ehrenfests bezorgdheid om het lot van zijn leerlingen was vergelijkbaar met die van Ornstein. Hij gedroeg zich als een soort vader en stelde alles in het werk om ze aan een baan te helpen – ook in het bedrijfsleven. Toen hij hoorde dat de fysicus Michels uit Amsterdam dreigde te worden weggekaapt door een groot Engels bedrijf, zag Ehrenfest dit als een mogelijkheid om het pad naar het Britse industriële lab te effenen voor een reeks andere jonge en veelbelovende Nederlandse natuurkundigen.⁶³

Ehrenfest probeerde net als Ornstein zijn studenten zo goed mogelijk voor te bereiden op onderzoek in de industrie. In Leiden lag de nadruk op de theorie en bestond het praktische werk voornamelijk uit collectieve oefeningen. Na Kamerlingh Onnes' emeritaat werd het practicum begeleid door De Haas, één van de twee hoogleraren experimentele natuurkunde die het stokje hadden overgenomen. De Haas stak echter zo min mogelijk tijd en geld in het up-to-date houden van de experimenten en de apparatuur. Er moest een serie standaardexperimenten worden uitgevoerd op reeds klaarstaande, verouderde en versleten apparatuur.⁶⁴ In Utrecht echter liet Ornstein zijn doctoraalstudenten meehelpen aan het onderzoek dat zijn promovendi uitvoerden. Hierdoor kregen studenten al direct na hun

⁶¹ Boersma, *Inventing structures*(2002), 152-157.

⁶² Heijmans, 'Wetenschap en industrie. L.S. Ornsteins opvattingen over toegepaste natuurkunde' (1994) 177-190, m.n. 187.

⁶³ Ehrenfest aan Kohnstamm, 2 mei 1928, APE ESC 6, sectie 7. Waarschijnlijk was ICI geïnteresseerd om Michels naar Engeland halen.

⁶⁴ Casimir, *Haphazard reality* (1983) 61-63.

kandidaats te maken met actueel experimenteel onderzoek.⁶⁵ Daarnaast voerde Ornstein veel toegepast onderzoek uit. Ehrenfest stuurde daarom de theoretische studenten Brinkman en Lindeman in mei 1928 simpelweg naar Ornstein, om in Utrecht de nodige vaardigheden op te doen met het oog op een eventuele carrière in de industrie. ‘Denn reine Theorie ist ja so schauderhaft gefährlich als Entwicklungsweg’, schreef Ehrenfest in een begeleidende brief aan Ornstein, waarin hij tevens de hoop uitsprak dat er in de toekomst meer van dit soort circulatie van studenten tussen Leiden en Utrecht zou kunnen plaatsvinden.⁶⁶ Ornstein zag echter niets in een dergelijke ‘samenwerking’ en was beducht voor de Leidse concurrentie: ‘Aan sterk contact met Leiden valt geloof ik niet te denken, maar als jij zelf eens gelegenheid hebt hier te komen zal ik het prettig vinden.’⁶⁷ Kennelijk viel Ehrenfest voor Ornstein niet onder ‘Leiden’; we zullen hieronder zien waarom.

Ehrenfest zette zich vervolgens in voor het versterken van het contact tussen de faculteit en de industrie op een bestendige manier. Hij pleitte bij curatoren voor een bijzondere leerstoel voor Holst. Hij onderbouwde zijn verzoek door te wijzen op de belangrijke rol die Leidse fysici speelden in de industriële laboratoria. Volgens Ehrenfest bestond er bij de industrie enerzijds behoefte aan natuurkundigen met ‘belangstelling en begrip voor de byzondere hulpmiddelen en werkmethoden’ die op het bedrijfslaboratorium werden gehanteerd, en anderzijds aan ingenieurs ‘met grondige kennis der physische verschijnselen.’ De ingenieurs werden in Delft opgeleid. Om de Leidse natuurkundestudenten een kans te geven op een baan in de industrie, was het zaak ze kennis van industriële werkmethoden aan te leren.⁶⁸ Ondertussen had hij Holst al voorzichtig gepolst of hij hiervoor zou voelen. De Leidse hoogleraren Fokker, De Haas en Keesom steunden het plan, dat in 1929 kon worden gerealiseerd.⁶⁹ Zo werd ook Leiden een belangrijke bron van fysici voor het NatLab.⁷⁰

⁶⁵ Heijmans, *Wetenschap tussen universiteit en industrie* (1994) 59–60.

⁶⁶ Ehrenfest aan Ornstein, 29 mei 1928, APE ESC 8, sectie 5.

⁶⁷ Ornstein aan Ehrenfest, 30 mei 1928, APE ESC 8, sectie 5.

⁶⁸ Hoogleraren in de natuurkunde aan Curatoren, 12 december 1928, APE ESC 8, sectie 4; Ehrenfest aan W.C. Beucker-Andreae, 29 januari 1930, APE ESC 1, sectie 4.

⁶⁹ Ehrenfest aan Fokker, 3 oktober 1928, APE ESC 4, sectie 4.

⁷⁰ Tussen 1920 en 1941 leverde Leiden zestien en Ornstein te Utrecht achttien gepromoveerde fysici aan Philips. Bij BPM, DSM en KEMA waren de verhoudingen heel anders: tegen één aan het Leidse lab gepromoveerde

Ornstein verstevigde op zijn beurt zijn positie ten opzichte van Leiden en Delft. In 1930 werd het bijvak technische fysica in Utrecht ingevoerd. In 1929 lukte het hem om, met behulp van de elektriciteitsbedrijven, J. van Staveren een bijzondere leerstoel in de elektrische technologie aan te bieden.

In weerwil van het wederzijdse respect tussen Ehrenfest en Ornstein, verliep hun contact altijd een beetje stroef. Volgens Ehrenfest moesten bij een ontmoeting 'beide doch immer ein ganz wenig knurren'.⁷¹ Ornstein was net als Ehrenfest een nogal overheersende persoonlijkheid. Bovendien voelde Ornstein zich door de Leidse experimentele fysici tegengewerkt bij het ministerie. Volgens Ornstein stak vooral De Haas zijn mening over hem niet onder stoelen of banken.⁷² In zijn ogen werd hij door tegenstanders (lees: De Haas) buiten de Akademie gehouden, zeer waarschijnlijk vanwege een combinatie van jaloezie en weerstand tegen zijn nauwe industriële contacten.⁷³ Ehrenfest had weinig op met de vete tussen de Leidse en Utrechtse experimentatoren. Ornstein voelde zich gesteund door Ehrenfest, die een goed contact op prijs stelde en had laten weten dat de Nederlandse fysici zoveel mogelijk moesten samenwerken.⁷⁴ Ehrenfest ondernam verscheidene pogingen om Ornstein tot de Akademie te laten toetreden. In 1926 pleitte hij voor toetreding van Holst en Ornstein tot de Akademie, en schreef hij samen met Van der Waals jr. een aanbeveling voor Ornstein.⁷⁵ Holst trad in 1926 wel toe tot de Akademie, Ornstein niet. In 1928 herhaalde Ehrenfest zijn oproep om Ornstein lid van de KAW te maken; een poging die hij in 1929 nog eens moest herhalen voordat Ornstein uiteindelijk op 7 mei 1929 tot de Akademie werd toegelaten.⁷⁶ Ehrenfest noemde Ornsteins innige contacten met het

medewerker leverde Utrecht er zeventien. Zie: Heijmans, *Wetenschap tussen universiteit en industrie* (1994) 160.

⁷¹ Ehrenfest aan L.S. Ornstein, 13 december 1926, APE ESC 8, sectie 5.

⁷² L.S. Ornstein aan Ehrenfest, 9 december 1926, 15 december 1926, 28 januari 1927, APE ESC 8, sectie 5. Nu had De Haas inderdaad de neiging 'hatelijke venijnigheden' te ventileren tegenover derden. Zie: Van Delft, *Heike Kamerlingh Onnes* (2005) 557.

⁷³ L.S. Ornstein aan Ehrenfest, 9 december 1926, APE ESC 8, sectie 5.

⁷⁴ L.S. Ornstein aan Ehrenfest, 9 december 1926, APE ESC 8, sectie 5.

⁷⁵ Ehrenfest aan Lorentz, 25 januari 1926, APE ESC 7, sectie 8; Ehrenfest aan P. Zeeman, 17 februari 1926, APE ESC 10, sectie 9.

⁷⁶ P. Zeeman aan Ehrenfest, 12 februari 1929, APE ESC 10, sectie 9; Ehrenfest, concept voordrachtsbrief KAW, februari 1929, APE ESC 8, sectie 5; Ehrenfest aan G. Holst, concept voordrachtsbrief KAW, november 1929, APE ESC 5,

bedrijfsleven niet in zijn aanbeveling, omdat die contacten in de ogen van sommigen geen aanbeveling waren. Hij legde de nadruk op Ornsteins grote zuiver wetenschappelijke merites.⁷⁷ Waarschijnlijk wilde hij De Haas niet in de kaart spelen.

Veranderingen binnen de universiteiten

In het interbellum werd het steeds duidelijker dat het ideaal van de academische vorming niet goed aansloot op de behoeften van de industrie. De vraag was of de universitaire opleiding moest worden veranderd, en zo ja, op welke manier. Die kwestie was niet nieuw; ze was door velen al aan de orde gesteld, onder andere in 1916 door de al eerder genoemde Backer.⁷⁸

Ehrenfest vreesde een verdringing van de steeds verder gespecialiseerde academici door de steeds breder opgeleide ingenieurs. De vraag was of de universiteit nieuwe maatschappelijke stromingen moest binnenhalen of buiten de deur moest houden.⁷⁹ Deze vraag kwam aan de orde tijdens een in februari 1930 door Ehrenfest georganiseerde discussieavond met Joffe en een aantal belangrijke universitaire bestuurders en curatoren. De discussie leek vooral bedoeld om de bestuurders duidelijk te maken hoeveel problemen het onderbrengen van nieuwe takken van onderwijs – zoals technische en handelswetenschappen – in gescheiden, specialistische hogescholen en instituten met zich meebracht voor de universiteiten. De gesprekken vonden plaats in het huis van de astronoom De Sitter, samen met de secretaris van het curatorium van de Leidse universiteit Philip Idenburg, rechtsgeleerde en voormalig rector magnificus Eduard Meiers, de historicus Johan Huizinga, de hoogleraar kindergeneeskunde Evert Gorter, en de oogheelkundige en secretaris van de Koninklijke Akademie J. van der Hoeve. Joffe sprak over de oorzaken van de dreigende

sectie 8;

http://www.knaw.nl/cfdata/leden/historisch_ledenlist.cfm?persoon=1375, geraadpleegd op 13 augustus 2009.

⁷⁷ Heijmans, *Wetenschap tussen universiteit en industrie* (1994) 121-128.

⁷⁸ Baneke, 'Toegepaste natuurwetenschap aan de universiteit – contradictie of noodzaak?' (2006) m.n. 32.

⁷⁹ P. Ehrenfest, aantekeningen voor een voordracht, Leiden, 6 februari 1930, APE ESC 3, sectie 7. Gezien de datum was dit een voordracht die plaatsvond op de discussieavond met Joffe.

vermorzeling van de Russische universiteiten tussen de specialistische wetenschappelijke instituten en de vakscholen.⁸⁰ Wilde de toekomst van de Nederlandse universiteiten zeker worden gesteld, dan was het volgens Ehrenfest zaak bijtijds nieuwe takken van het hoger onderwijs aan de universiteiten te verbinden. De ingenieurswetenschappen hadden de universiteiten zich al laten ontglippen, iets wat ook in Duitsland was gebeurd. Maar ook de landbouwkunde, diergeneeskunde (behalve in Utrecht) en handelswetenschappen (behalve in Amsterdam) hadden de universiteiten links laten liggen. Leiden had de koloniale wetenschappen en oriëntaalse talen gelukkig behouden. Het ging er volgens Ehrenfest om dat de samenhang van de universiteit met de nieuw opkomende, belangrijke levensuitingen van de natie moest worden behouden. Anders zouden de universiteiten zich net als de gymnasia steeds meer met vrouwelijke studenten vullen en zou het steeds lastiger worden om goede leraren te vinden. Enkele voortekenen van dergelijke 'ontaarding' waren al in enige vakken en zelfs in hele faculteiten te bemerken.⁸¹

Eind juni 1930 bracht Ehrenfest een tweede bezoek aan de Verenigde Staten. Hij schreef aan Philip Idenburg, die ook de voordracht van Joffe had bijgewoond, over zijn hernieuwde indrukken betreffende het Amerikaanse hoger onderwijs. Het viel hem op dat de Amerikaanse staatsuniversiteiten systematisch iedere nieuwe tak van hoger onderwijs nauw aan zich verbonden, en ook actief de nieuwe privé-scholen aan zich wisten te binden. De samenhang tussen universiteit en maatschappij was hierdoor breder dan in Nederland, wat zowel van grote betekenis was voor de politiek, als voor industriëlen en zakenmensen. De sterke band met de maatschappij zorgde er in de Verenigde Staten voor dat ruim de helft van het gigantische universitaire budget bestond uit bedrijfs- of privé-kapitaal.⁸²

Idenburg was zeer geïnteresseerd in Ehrenfests brieven over de toestand aan de Amerikaanse universiteiten. Ook hij maakte zich zorgen over de vraag hoe de Europese universiteiten de komende tientallen jaren hun positie konden behouden tegenover de snelgroeiende Amerikaanse universiteiten. Ehrenfest vond in hem een medestander voor zijn streven naar innige samenwerking tussen de exacte wetenschappen en de industrie. Idenburg was het net als Ehrenfest eens met de Amerikaanse

⁸⁰ Ehrenfest aan S. Goudsmit, 9 februari 1930, APE ESC 5, sectie 1.

⁸¹ Ehrenfest aan familie, 6 juli 1930, APE EPC 1, sectie 8.

⁸² Ehrenfest aan P.J. Idenburg, 12 juli 1930, APE EPC 1, sectie 8.

gewoonte om ‘nieuwe levensuitingen’ op te nemen in de universiteit, al meende hij wel dat het de meeste Amerikanen ontbrak aan ‘een zekere kulturele basis’.⁸³

Als secretaris van Curatoren moest Idenburg officieel toestemming geven voor Ehrenfests verlof. Ehrenfest wist door zijn enthousiaste brieven aan Idenburg zijn verlof in Leiden met enkele maanden te rekken, zodat hij langer in Amerika kon blijven.⁸⁴ Deze extra tijd benutte hij om in januari 1931 bij P.A. Levene thuis de invloedrijke Amerikaanse didacticus Abraham Flexner te bezoeken.⁸⁵ Flexner had in 1930 een boek geschreven over de verschillende manieren waarop het hoger onderwijs in de VS, Engeland en Duitsland werd vormgegeven.

Flexner maakte duidelijk dat er risico’s kleefden aan het Amerikaanse systeem. Nederlandse academici worstelden al langer met de mogelijke voor- en nadelen van het Amerikaanse systeem.⁸⁶ Tijdens Ehrenfests verblijf in de VS verscheen Kruyts brochure *Hoogeschool en Maatschappij*, waarmee de discussie over de amerikanisering van het Nederlandse hoger onderwijs pas goed losbarstte. Kruyt haakte met zijn brochure precies in op de zaken die Ehrenfest tijdens de discussieavonden en in zijn brieven al aan de orde had gesteld. Terug in Nederland schreef Ehrenfest dat Kruyt voortreffelijk had getoond hoe de universiteiten in Nederland de ‘levendige wisselwerking met belangrijke stromingen in en problemen van de maatschappij’ dreigden te verliezen. Maar hij waarschuwde ervoor niet alles uit Amerika over te willen nemen. Hij was weliswaar onder de indruk van de praktische vaardigheden die op een high school te Michigan werden aangeleerd, maar er werd naar zijn mening wel heel erg aangestuurd op de praktijk.⁸⁷ Bijgevolg was de high school van inferieure kwaliteit in vergelijking met het Nederlandse gymnasium en HBS:

Die Schülern lernen nicht “echt” denken. Ja selbst nur in unserem Sinne zu “lesen” (lesen von Monatschriften gilt schon als sehr

⁸³ P.J. Idenburg aan Ehrenfest, 6 augustus 1930; 30 november 1930, APE ESC 5, sectie 9.

⁸⁴ Ehrenfest aan P.J. Idenburg, 13 november 1930, APE ESC 5, sectie 9; A.D. Fokker aan Ehrenfest, 12 december 1930, APE ESC 4, sectie 5.

⁸⁵ P.A. Levene aan Ehrenfest, 27 januari 1931; Ehrenfest aan P.A. Levene, 15 maart 1931, APE ESC 7, sectie 3.

⁸⁶ Bijvoorbeeld in: Kohnstamm aan Ehrenfest, 21 maart 1931, APE ESC 6, sectie 8.

⁸⁷ Ehrenfest aan familie, 13 juli 1930, APE EPC 1, sectie 8.

bemerkenswerte culturelle Thätigkeit). Rezeptmässiges Wissen, practisch anwendbares und scheinbar practisch anwendbares steht ganz im Vordergrund. Wenn es über das erlernen gewisser Techniken (wie Maschinschreiben, handwerk und primitievstes Rechnen) hinaus geht, löst sich sehr bald in eine Art “Kranten-Headline-Geklets” auf. Allerdings dann auch schon über alles in der Welt: über Negerproblem und Immigration, Bekämpfung von Hookwormziekte und Malaria, Einsteinsche relativitätstheorie, Radio und Dynamomaschinen [...].⁸⁸

Ook haalde Ehrenfest het boek van Flexner aan, waarin die zich kritisch uitliet over de al te gespecialiseerde en op het nut gerichte universiteit. Het nut hoorde niet thuis op de universiteiten aldus Flexner, omdat teveel nadruk hierop alleen maar leidde tot verslappende academische normen, met als gevolg dat iedereen aan de universiteit kon studeren. Zo werd men noch tot het vervullen van maatschappelijk nuttige functies, noch tot het verrichten van wetenschappelijk onderzoek opgeleid.⁸⁹ De universiteiten werden hierdoor alleen maar groter en groter, tot ze verworden waren tot megalomane gedrochten. Volgens Ehrenfest was het universitaire systeem in de Verenigde Staten te zeer toepassingsgericht geworden. Dat had invloed op de middelbare schoolopleiding. Die school diende immers voor te bereiden op de universiteit, en tevens waren veel leraren afkomstig uit de universiteit. Dit gegeven leidde ertoe dat de middelbare school de leerlingen om te beginnen al een verkeerde, onwetenschappelijke manier van denken aanleerde.⁹⁰ Ehrenfest greep de discussie onmiddellijk aan om te proberen Flexner naar Leiden te krijgen voor eenzelfde informele discussie zoals die ook met Joffe had plaatsgevonden. Flexner hoopte in de herfst naar Leiden te kunnen komen, maar het is niet bekend of hij dat

⁸⁸ Ehrenfest aan Kohnstamm, 28 maart 1931, APE ESC 6, sectie 8.

⁸⁹ Flexner, *Universities. American, English, German* (1930). Ehrenfests eigen exemplaar is nog aanwezig in zijn bibliotheek en is op cruciale plaatsen geannoteerd. Hieruit valt op te maken dat hij veel van zijn reserves over het Amerikaanse systeem rechtstreeks uit Flexners boek haalde. Zie over de amerikanisering, de invloed van Flexner en de brochure van Kruyt: Van Berkel, ‘Amerikanisering van de Nederlandse Universiteit?’ (1989) m.n. 220-222.

⁹⁰ Ehrenfest aan Kohnstamm, 28 maart 1931, APE ESC 6, sectie 8. Deze argumenten vinden we terug in Ehrenfests onderstrepingen van passages uit Flexners boek, pag. 50-52.

ook daadwerkelijk heeft gedaan.⁹¹

Ehrenfest was het in zoverre met Flexner eens dat ook naar zijn inzicht de nadruk aan de universiteit moest blijven liggen op zuiver wetenschappelijk onderzoek en onderwijs. Desondanks was hij van mening dat de universiteit veel sterker toenadering moest zoeken tot de maatschappij en ook praktische opleidingen binnen haar gelederen moest toelaten. Het resultaat zou een soort symbiose zijn tussen toegepast en zuiver wetenschappelijk onderzoek, die binnen de universiteit als aparte takken naast elkaar konden blijven bestaan. Met het idee om toegepaste wetenschap een plek te geven binnen de universiteit ging Ehrenfest verder dan collega's als Went en Kruyt, en kwam zijn visie veel meer overeen met die van Ornstein.

Pragmatische motieven vormden zeker een drijfveer voor Ehrenfests opvatting over hoe universitaire wetenschap eruit moest zien. Maar daarnaast gingen deze motieven hand in hand met een ideaal, namelijk het geloof dat wetenschap de maatschappij van nut kon en moest zijn. Dit aspect zal verder aan de orde komen in het volgende hoofdstuk.

⁹¹ Ehrenfest aan A. Flexner, 23 april 1931; A. Flexner aan Ehrenfest, 13 mei 1931, APE ESC 4, sectie 2.

Hoofdstuk 6

Theoretische fysica in tijden van depressie

Es zeigte sich, dass sie keine Ahnung hatte wie weitgehend sich Wissenschaft und speziell auch mathematisch entwickelte Wissenschaft auf die Klärung sozialer Fragen anwenden lasse.

Ehrenfest over studente J.C. Thoden-van Velzen¹

Inleiding

In het laatste jaar van de Eerste Wereldoorlog ontving Albert Einstein in Berlijn uit het neutrale Nederland een brief van Ehrenfest. Gewoonlijk besprak Ehrenfest in zijn brieven de nieuwste ontwikkelingen in de theoretische fysica, maar tot Einsteins verbazing schreef hij ditmaal dat hij zich helemaal niet meer met de fysica bezighield. De laatste maanden werd zijn aandacht namelijk getrokken door de politieke economie.² Ehrenfest was druk bezig allerhande economische literatuur te lezen en liet zijn mathematisch-fysische kennis los op economische vraagstukken.

Dat is opmerkelijk, aangezien de theoretische natuurkunde een voorbeeld was van een vakgebied dat juist heel ver van enige maatschappelijke toepassing verwijderd is. Theoretisch fysici als J.D. van der Waals en H.A. Lorentz werkten in grote isolatie aan abstracte wetenschappelijke problemen, zonder dat dit in de verste verte iets met maatschappelijk nut of toepasbaarheid te maken had. Ook een experimenteel fysicus als Kamerlingh Onnes meende dat zijn onderzoek geen enkel praktisch doel diende.³

¹ Ehrenfest aan Galinka Ehrenfest, 30 maart 1929, APE EPC 1, sectie 7.

² Ehrenfest aan Einstein, 27 maart 1918, in: EP 8B, doc. nr. 494.

³ Baneke, *Synthetisch denken* (2008) 48; Kamerlingh Onnes, *De betekenis van nauwkeurige metingen bij zeer lage temperaturen* (1904).

Lorentz begon zich echter vanaf het begin van de Eerste Wereldoorlog meer bezig te houden met maatschappelijk nuttige zaken. Van 1918-1926 verrichtte hij een grote hoeveelheid theoretisch werk voor de Zuiderzeecommissie.⁴ Vooral door deze bijdragen werd hij een nationale bekendheid. Maar Lorentz was zeker niet de enige wetenschapper die zich sterker ging richten op de maatschappij; in tal van studies over andere wetenschappers in de periode 1900-1940 komt een beeld van maatschappelijke betrokkenheid naar voren.⁵ Die betrokkenheid wordt in de regel als uitzondering gepresenteerd, maar met zoveel uitzonderingen wordt het wellicht tijd dat de regel wordt aangepast.⁶ Dat is zeker de conclusie van de historicus Baneke.⁷ Baneke bracht een aantal onderwerpen in kaart die door wetenschappers werden aangesneden in oraties, kranten- en tijdschriftartikelen en boeken. Hij stelde vast dat intellectuelen in de periode van 1900 tot 1940 een toenemende noodzaak zagen voor een maatschappelijk dienstbare wetenschap. Volgens hem bemoeiden veel wetenschappers zich met de maatschappij, maar waren er maar weinigen die daar een dagtaak van maakten. Velen namen in hun vrije tijd zitting in onderwijscommissies en organisaties. Een aantal wetenschappers ontwikkelde technocratisch georiënteerde ideeën. Ze mengden zich in het debat over de grote maatschappelijke vragen van hun tijd. Maar meer dan een aanzet geven deden ze niet; ze waren slechts wegbereiders voor de grote veranderingen die na de Tweede Wereldoorlog plaatsvonden.

Hun manier van wetenschap bedrijven veranderde niet. Experimentele fysici zochten bijvoorbeeld op vrij grote schaal toenadering tot de industrie – en bleven daarmee zeer dicht bij hun experimentele expertise. Zoals we in het vorige deel hebben gezien, was dit voor een deel ingegeven door een ideologie, namelijk dat de zuivere wetenschap een noodzakelijk fundament vormde voor praktische toepassingen en maatschappelijk nut. Maar de nauwe banden met de

⁴ Kox, 'Uit de hand gelopen onderzoek in opdracht' (2007) 39-52, m.n. 51.

⁵ Heijmans, *Wetenschap tussen universiteit en industrie* (1994); Klomp, *De relativiteitstheorie in Nederland* (1997); Somsen, "*Wetenschappelijk onderzoek en algemeen belang*" (1998); Van Berkel, 'Wetenschap en wijsbegeerte in het werk van Jacob Clay' (1998); De Jong en Van Lunteren, 'Fokkers "greep in de verte". Nederlandse fysica en filosofie in het interbellum' (2003) 1-21; Molenaar, *De rok van het universum. Marcel Minnaert, astrofysicus 1893-1970* (2003); Baneke, *Synthetisch denken* (2008).

⁶ Van Lunteren, *Uit de ivoren toren* (2003).

⁷ Baneke, *Synthetisch denken* (2008).

industrie vormden ook een legitimatie voor het wetenschappelijk onderzoek en dienden mede om onderzoekscapaciteiten te behouden en uit te breiden, en om werkgelegenheid voor studenten te bevorderen.⁸ Baneke ziet de Eerste Wereldoorlog in dit opzicht niet als een grote cesuur. Ontegengesteld hielen wetenschappers zich zeer serieus bezig met de maatschappij. Maar de maatschappelijke bemoeienissen van wetenschappers bleven in het interbellum voor hen een secundaire rol spelen naast het wetenschappelijk onderzoek.

Op deze regel vormden tenminste drie personen belangrijke uitzonderingen. Zij gingen nog verder in hun streven naar maatschappelijk nuttig werk.⁹ Zij poogden hun wetenschappelijke werk op directe wijze in te zetten ter verbetering van de maatschappij. Daarbij veranderde dat wetenschappelijk werk ook ingrijpend. Het gaat hier om drie fysici, die ook nog eens nauw met elkaar verbonden waren.

Philip Kohnstamm keerde zich in 1919 af van zijn fysisch onderzoek en accepteerde een leerstoel in de pedagogiek – een vakgebied dat academisch gezien in de kinderschoenen stond. Kohnstamm vond de pedagogische wetenschap van groter belang dan de natuurwetenschap. In het interbellum werd hij één van de meest invloedrijke intellectuelen en de belangrijkste pedagoog in Nederland. Hij zou zijn stempel drukken op het naoorlogse onderwijsbeleid.¹⁰

Ehrenfest was een andere fysicus die zijn wetenschap direct inzette ten behoeve van de maatschappij. Net als Kohnstamm werkte hij – zij het maar voor korte tijd volledig – op het terrein van een ander vakgebied: de economie. In dit hoofdstuk zal ik Ehrenfest opvoeren als een voorbeeld van een wetenschapper die vond dat zuivere wetenschap altijd als basis moest dienen voor eventueel toegepast wetenschappelijk onderzoek. Hij meende dat hij daarmee een bijdrage kon leveren van concreet maatschappelijk nut, en zocht juist vanuit deze visie op

⁸ Hollestelle, 'Zuivere praktijk: Paul Ehrenfests opvattingen over toegepaste natuurkunde' (2007) 53-65.

⁹ Ik heb hier gekozen om drie voorbeelden te noemen die nauw met elkaar verbonden waren, maar er waren meer voorbeelden, zie o.a. Knegtman over Laqueur en Theunissen over Hagedoorn: Knegtman, 'Onderwijs, wetenschap en particulier initiatief' (2000); Knegtman, 'Professor Ernst Laqueur en de grenzen aan het internationalisme' (2009); Theunissen, 'Een mooie koe is een goede koe' (2008); Theunissen, 'Breeding without Mendelism' (2008); Theunissen, *De Koe* (2010).

¹⁰ Zie hiervoor: Hollestelle, *'Beperkte spontaniteit'. Leven en werk van Philip Kohnstamm* (2004).

wetenschap toenadering tot de praktijk. Hij werd gedreven door het idee dat de theoretische natuurkunde de noodzakelijke wetenschappelijke bagage leverde voor het wetenschappelijk behandelen van economische vraagstukken. Mede onder zijn invloed raakte Ehrenfests student, de theoretisch fysicus Jan Tinbergen – uitzondering nummer drie – op het spoor van het toepassen van mathematisch-fysische methoden in de economie. Ehrenfest leverde zo een bewuste bijdrage aan de vormgeving van een nieuw wetenschappelijk vakgebied, dat na de Tweede Wereldoorlog zou uitgroeien tot de econometrie. Door het samengaan van wiskunde, economische theorie en statistiek was het mogelijk mathematische modellen te construeren die, zo was het idee van Ehrenfest en Tinbergen, de effecten van ingrijpen in de nationale economie konden voorspellen. Ook andere wetenschappers, zoals Kohnstamm en Burgers, ondergingen de invloed van Ehrenfest en kwamen net als hij onder de indruk van de mogelijkheden die wetenschap kon bieden tot het verhelderen van maatschappelijke vraagstukken.

Allereerst zal in dit hoofdstuk de herkomst van Ehrenfests belangstelling voor de economie aan bod komen, en de drijfveren die hem Tinbergen richting de economie deden duwen. Onder de indruk van de economische resultaten van Tinbergen kreeg Ehrenfest het idee nog meer fysici voor de economie te winnen. De basis hiervoor werd gelegd door Ehrenfests technocratische ideeën, die hij gemeen had met zijn studenten Tinbergen en Burgers, en met zijn vrienden Tolman, Kohnstamm en Goudriaan. Zoals ik zal laten zien past Ehrenfest daarmee niet alleen in een bredere stroming, maar heeft hij ook voor een belangrijk deel aan de vorming van het technocratisch gedachtegoed binnen Nederland bijgedragen.

Ehrenfests economische belangstelling

Ehrenfest was hoogleraar in een periode waarin zowel de theoretische natuurkunde als de maatschappij gekenmerkt werden door schokkende, snelle veranderingen. Door de revolutionaire ontwikkelingen van de quantumtheorie en de Eerste Wereldoorlog werd Ehrenfests interesse voor de wetenschappelijke economie aangewakkerd. Zijn werk aan de quantumtheorie stagneerde, mede omdat zijn grote natuurkundige prestatie – de door hem ontwikkelde adiabatische hypothese – geen

aandacht kreeg.¹¹ Zijn daardoor terugkerende depressieve klachten ondermijnden zijn motivatie voor het fysisch onderzoek. Een bijkomende oorzaak was gelegen in het vastlopen van de internationale samenwerking tussen fysici. De verhoudingen tussen Duitse wetenschappers en die afkomstig uit de geallieerde landen was danig verstoord door de Eerste Wereldoorlog. Voor Ehrenfest was dit reden om afstand te doen van zijn Oostenrijkse nationaliteit en de Nederlandse nationaliteit aan te vragen. Bovendien ging de economie nationaal en internationaal door een diep dal. Levensmiddelen gingen op de bon, gas en elektriciteit werden gerantsoeneerd. Het wegvallen van de behoefte om fysisch onderzoek te verrichten deed geen afbreuk aan Ehrenfests eeuwige drang om zichzelf nuttig te maken. Hij wilde in ieder geval ergens aan bijdragen en de slechte economische omstandigheden brachten hem op het idee om zijn fysische kennis toe te passen op economische problemen.

Uit de boeken die aanwezig zijn in Ehrenfests bibliotheek kan worden opgemaakt dat hij zich al ruim voor deze tijd verdiepte in sociale en economische vraagstukken. Zo bevatte zijn bibliotheek een rijk geannoteerd en werkelijk stukgelezen boek van de Marxist en sociaal activist Werner Sombart, hoogleraar handelswetenschappen te Berlijn, en een boek van de Duitse econoom Richard Ehrenberg. Dat laatste boek las Ehrenfest al in 1904.¹² Ehrenberg was een Duitse econoom die voorstander was van een rationele en natuurwetenschappelijk onderbouwde economie. Ook in 1915 las Ehrenfest economisch werk, maar pas in 1918 raakte hij daadwerkelijk gegrepen door het onderwerp, en wel door studie van de Marxistische economie zoals weergegeven in het werk van Karl Kautsky. Hij raakte diep onder de indruk van het marxisme en begon alles wat erover geschreven was te lezen, onder andere van de marxist Rudolf Hilferding. Ook las hij het werk van de belangrijkste neoklassieke economen. Hij vond dat zowel het Marxisme als de klassieke ‘Marginaltheorie’ minpunten hadden en hij begon zich af

¹¹ Klein, *Paul Ehrenfest* (1970) 264-292; Hollestelle, ‘Paul Ehrenfest as a Mediator’ (2006) m.n. 790-791.

¹² Sombart, *Die Juden und das Wirtschaftsleben* (1911); Ehrenberg, *Sozialreformer und Unternehmer: unparteiische Betrachtungen* (1904). Beide boeken zijn in het jaar van uitgave bestudeerd door Ehrenfest, zoals valt af te lezen aan de aanwezigheid van Ehrenfests handtekening, datering en annotaties. Boeken aanwezig in de boekencollectie Paul Ehrenfest.

te vragen of er geen manier was om de kloof tussen beide te dichten.¹³

Van oktober 1917 tot mei 1918 werkte hij aan niets anders dan economie.¹⁴ Zijn motivatie was volgens eigen zeggen dat hij zich de ellende van het proletariaat aantrok.¹⁵ Hoewel Ehrenfest geen rechtgeaarde socialist was, had hij zeker linkse sympathieën.¹⁶ Zijn bijnaam in Leiden was de ‘rode professor’. Zijn huis was een brandpunt voor jonge socialistische en communistische academici. Zijn linkse neigingen blijken ook uit zijn Tolstoiaanse sobere levensstijl en afkeer van alcohol en tabak, zijn afkeer van formaliteiten en zijn uitgesproken internationalisme.¹⁷ Zijn dochter Galinka was overtuigd communist, en ook zijn vrouw Tatyana had socialistische sympathieën.¹⁸ Ehrenfest zelf was echter niet in staat een bepaalde stroming aan te hangen. Hij vond met zijn kritiek altijd wel een zwak punt in een ideologie. Toen Einstein Ehrenfest probeerde te porren zich in te zetten voor het Zionisme, schreef Ehrenfest terug:

‘Mir fehlt der kritiklose Glaube. ... Menschen wie ich sind untauglich für Anschluss an massale Actionen. Aber: wenn ihr mir ein scharf umrissenes technisches Problem stellt für das ich irgendwie eine spezifische Eignung haben könnte – vielleicht bekomme ich dann unter der Arbeit das Vertrauen.’¹⁹

Bij zijn economische activiteiten blijkt het inderdaad te gaan om maatschappelijke problemen die in principe als een nauw omschreven groep technische problemen kunnen worden opgelost.

Ehrenfest constateerde dat er een duidelijke analogie aanwezig

¹³ Ehrenfest aan Schumpeter, 3 mei 1918, APE ESC 10, sectie 5. Qua politiek-economische opvattingen lijkt Ehrenfest een evenwicht te willen vinden tussen het marxisme en het kapitalisme. Dit beeld wordt nog eens onderstreept door een brochure die zijn vrouw en geestverwant Tatyana Ehrenfest net na de Tweede Wereldoorlog publiceerde: Ehrenfest-Afanassjewa, *Relevia. Een nieuw economisch systeem, een orde, waarin ik zelf ook graag zou willen leven* (1946).

¹⁴ Klein, *Paul Ehrenfest* (1970) 305.

¹⁵ Ehrenfest aan Schumpeter, 3 mei 1918, APE ESC 10, sectie 5.

¹⁶ Zo deelde D.J. Struik aan H.A. Klomp mee; Klomp, *De relativiteitstheorie in Nederland* (1997) 48.

¹⁷ Alberts, ‘On connecting socialism and mathematics’ (1994).

¹⁸ A.J. Rutgers aan Ehrenfest, 17 januari 1929, APE ESC 9, sectie 2; D.J. Struik, *Autobiographical Notes* (1973) hfdst 6, 11.

¹⁹ Ehrenfest aan Einstein, 24 november 1919, EP 9, doc. nr. 175.

was tussen economische processen en de fysische thermodynamica. Vandaar dat hij zijn werk treffend samenvatte als ‘Ökodynamik’, een samentrekking van ‘Ökonomie’ en ‘Thermodynamik’.²⁰ Tot nu toe werd volgehouden, onder anderen door Ehrenfests biograaf Martin Klein, dat Ehrenfest voornamelijk geïnteresseerd zou zijn in deze analogie tussen thermodynamica en economie. Het zou hebben gepast bij zijn heel eigen stijl van fysica bedrijven.²¹ Hieronder zal ik echter betogen dat het veel meer voor de hand ligt dat deze analogie bij Ehrenfest de opvatting schraagde dat de theoretische fysica kon worden ingezet als zuiver wetenschappelijke basis voor toepassingen binnen de economie.

In 1918 kwam een einde aan de oorlog en werden de contacten tussen Nederlandse fysici en hun buitenlandse collega’s hersteld. Einsteins aanmoedigingen en Niels Bohrs aandacht voor Ehrenfests baanbrekende adiabatiese hypothese gaven hem hernieuwde moed om zijn fysische werk weer op te pakken.²² Begin mei ontving hij een brief van Bohr waarin deze meldde dat hij Ehrenfests adiabatiese hypothese had gebruikt in een artikel. Prompt stopte Ehrenfest met het maken van economische aantekeningen.²³ Resultaten van zijn economisch onderzoek heeft hij nooit gepubliceerd, en tot de gedroomde synthese tussen Marx en het kapitalisme is het bij Ehrenfest nooit gekomen. Wel bleef hij zijn hele leven naast zijn theoretisch fysisch onderzoek en onderwijs actief op het gebied van de theoretische economie. Zo correspondeerde hij met Nederlandse, maar ook met buitenlandse economen. Dat waren niet de minsten; hij schreef onder anderen met de economen Bowley en Schumpeter.²⁴

Ehrenfests plan: Een fysisch-economische opleiding

Zoals we in hoofdstuk 2 hebben gezien droeg Ehrenfest zijn opvattingen graag uit. Als docent was hij ongeëvenaard. Hij omringde zich met enthousiaste, jonge studenten. Eenmaal in de invloedssfeer van de

²⁰ Ehrenfest aan Einstein, 27 maart 1918, in: EP 8B, doc. nr. 494.

²¹ Klein, *Paul Ehrenfest* (1970) m.n. 305-306.

²² Hollestelle, ‘Paul Ehrenfest as a Mediator’ (2006) 787-792, m.n. 790-791.

²³ Klein, *Paul Ehrenfest* (1970) 305, n.49.

²⁴ A.L. Bowley aan Ehrenfest, 15 juli 1926, APE ESC 2, sectie 6; Ehrenfest aan [Schumpeter], 3 mei 1918, APE ESC 10, sectie 5; Ehrenfest aan Schumpeter, 22 februari 1931; Schumpeter aan Ehrenfest, 7 mei 1931, APE ESC 9, sectie 5.

charismatische Ehrenfest werden zij veelvuldig voorzien van vaderlijk advies op allerlei gebied. Zelfs over hun partnerkeuze had Ehrenfest een mening. Hij praatte met studenten over allerlei vraagstukken betreffende onderwijs, politiek, wereldbeschouwing en 'bolsjewisme'.²⁵ Zijn studenten hoorden ook van zijn opvattingen betreffende de 'mathematische staatshuishoudkunde'.²⁶ Studenten als de Marxist Dirk Struik pakten Ehrenfests ideeën op. Struik volgde in 1916 colleges bij de Leidse hoogleraar staatshuishoudkunde Van Blom.²⁷ Datzelfde jaar oogstte Struik bijval met een voordracht 'over de toepassing van de mathesis in economiese kwesties' op een bijeenkomst van het dispuut Christiaan Huygens.²⁸ Struik heeft zich voor zover bekend verder niet meer met economie beziggehouden. Hij bouwde een internationale carrière op als wiskundige. Dit voorbeeld laat echter wel zien dat de toepassing van wiskunde in de economie al in 1916 onderwerp van discussie was onder Leidse studenten. De slechte economische omstandigheden tijdens de oorlog zullen hier aan bijgedragen hebben.

Hoewel de economie na de oorlog weer was opgekrabbeld had Nederland van 1921 tot 1923 te maken met een ernstige economische inzinking. In 1921 begon Jan Tinbergen (1903-1994) aan een studie natuurkunde aan de Universiteit Leiden. Zoals veel van Ehrenfests studenten was ook Tinbergen socialist en vanaf 1922 lid van de SDAP. Het jaar daarop werd hij assistent van Ehrenfest. Hij raakte in die tijd zelf al meer en meer vervuld van de wens om in een maatschappelijk nuttige richting verder te gaan. Vandaar dat mentor Ehrenfest hem aanraade om zijn theoretisch fysische kennis toe te passen op het gebied van de mathematische economie.²⁹ Hij raakte enthousiast en besprak zijn ideeën over 'mathematische economie' op een bijeenkomst van Christiaan Huygens in oktober 1923.³⁰ Onder leiding van Ehrenfest begon hij aan een grondige studie van de economie. Van juli 1924 tot begin 1926 liet

²⁵ Ehrenfest aan Bohr, 4 juni 1919, NBA; Ehrenfest aan Lorentz, 26 februari 1919, Lorentzarchief, toegangsnr. 364, inv. nr. 20.

²⁶ Ehrenfest aan Lorentz, 26 februari 1919, Lorentzarchief, toegangsnr. 364, inv. nr. 20.

²⁷ Struik, *Autobiographical Notes* (1973) hfdst 5, 12-13.

²⁸ Notulenboek F7, bijeenkomst van 5 juni 1916, Archief Dispuut Christiaan Huygens.

²⁹ Ik noem dit hier 'mathematische economie', omdat dit de terminologie is die Ehrenfest en Tinbergen voor dit gebied gebruikten.

³⁰ Notulenboek F9, bijeenkomst van 2 oktober 1923, Archief Dispuut Christiaan Huygens.

Ehrenfest in de tuin, met van links naar rechts: Dieke, Goudsmit, Jan Tinbergen, Ehrenfest, Kronig, Fermi.

AIP Emilio Segre Visual Archives, Fermi Film Collection, Gousmit Collection

Ehrenfest hem kennismaken met de werken van de bekende economen Bowley, Wicksell, Pareto, Barone en Roos.³¹

Tinbergen raakte onder de indruk van de mogelijkheden die de toepassing van wiskundige methoden in de economie leek te bieden. Niet lang hierna verschenen zijn eerste publicaties op economisch terrein. De wiskundige economie kon volgens hem een alternatief bieden voor het kapitalisme, en iedere burger welvaart verschaffen. Vandaar dat hij jonge socialisten opriep om de economie te bestuderen als voorbereiding voor hun toekomstige maatschappelijke taak.³² In 1927 vervulde hij negen maanden van zijn vervangende dienstplicht bij het Centraal Bureau voor

³¹ Tinbergen, *Minimumproblemen in de natuurkunde en ekonomie* (1929) m.n. x.

³² Tinbergen, 'Verstand of gevoel' (1924) 24-25; Tinbergen, 'Wiskunde – grenswaarde – Marx' (1925) 65-68.

de Statistiek. Hier werd hij enthousiast over het gebruik van de statistische methode in de economie.³³ Het hielp daarbij dat Tinbergen door Ehrenfest onderwezen was in de statistische fysica.

In 1927 drong Ehrenfest toch aan op een fysisch proefschrift ter afronding van Tinbergens studie. Daarbij zouden diverse minimumproblemen in de natuurkunde moeten worden uitgediept.³⁴ Twee jaar later verscheen *Minimumproblemen in de natuurkunde en ekonomie*. In een appendix werden de besproken theoretisch fysische principes toegepast op economische problemen. Volgens de historicus Alberts zou de vorm van het proefschrift erop wijzen dat Ehrenfest het slechts zou hebben gedoogd dat Tinbergen in zijn proefschrift naast fysica ook economie behandelde. Ook de historicus Jolink lijkt naar die suggestie te neigen.³⁵ Maar Ehrenfest had een bepaalde bedoeling met het proefschrift, zo legde Tinbergen in het voorwoord van zijn proefschrift uit. Niet alleen het aanhangsel, maar het gehele onderwerp van de dissertatie was ‘speciaal gekozen met het oog op de analogie die de behandelde natuurkundige problemen waarschijnlijk [*sic*] zouden vertonen met zekere economische [*sic*] problemen, waarop in het aanhangsel wordt gewezen.’³⁶ De fysische analogieën leken binnen de economie veelbelovend, en dat bleek temeer toen Tinbergen in 1928, nog tijdens het werk aan zijn proefschrift, gebruik maakte van een analogie voor een artikel over de ruiltheorie. Het ruilen van goederen bleek wiskundige overeenkomsten te vertonen met het uitwisselen van energie door twee thermodynamische systemen. Bij het onderling ruilen van twee goederen X en Y tussen twee personen A en B was de waarde van de goederen U_a en U_b vergelijkbaar met het uitwisselen van potentiële energie tussen twee fysische systemen.³⁷

Het afronden van zijn opleiding met een natuurkundig proefschrift was volgens Ehrenfest noodzakelijk. Het proefschrift vormde

³³ Tinbergen, *Minimumproblemen in de natuurkunde en ekonomie* (1929)

³⁴ Ehrenfest aan J. Tinbergen, 25 december 1927, Tinbergenarchief, Ordner 1A (1926-1930).

³⁵ Alberts, *Jaren van berekening* (1998) 128n; Alberts, ‘De opkomst van het wiskundig modelleren’ (2000) 59-67, m.n. 67n; Jolink, *Jan Tinbergen: The statistical turn in economics 1903-1955* (2003) 27. Alberts noemt Tinbergens overstap van natuurkunde naar economie ook wel een ‘successful failure’, zie: Alberts, ‘On Connecting Socialism and Mathematics: Dirk Struik, Jan Burgers, and Jan Tinbergen’ (1994) 280-305, m.n. 299.

³⁶ Tinbergen, *Minimumproblemen in de natuurkunde en ekonomie* (1929) m.n. 1.

³⁷ Boumans, *A case of limited physics transfer* (1992) 12-14.

de afsluiting van de volgens Ehrenfest essentiële zuiver wetenschappelijke basis. Pas nadat deze basis was gelegd kon iemand zich richten op de verdere ontwikkeling binnen het toegepast wetenschappelijk onderzoek.³⁸ Dit zou ook een serie analogieën en technieken kunnen opleveren voor Tinbergens verdere economische vorming. Naast Tinbergen werd ook de econoom H.N. Gilbert (1901-1990) hier door Ehrenfest vaderlijk op gewezen. Ehrenfest had Gilbert op een reis door de Verenigde Staten leren kennen. Volgens Ehrenfest stond de Amerikaanse preoccupatie met nuttigheid juist de succesvolle toepassing van wetenschap op de maatschappij in de weg.³⁹ Toegepast wetenschappelijk werk kon naar zijn mening pas plaatsvinden na een periode van grondige, zuiver wetenschappelijke vorming. Naar zijn smaak had Gilbert te weinig theoretische scholing genoten om zijn werk afdoende in dienst te stellen van de maatschappij.⁴⁰ Ehrenfest bood aan die scholing te bieden en nodigde Gilbert uit om naar Leiden te komen.⁴¹

Ehrenfest vond de fysica uit Tinbergens dissertatie ook bruikbaar binnen de theoretische natuurkunde, maar hij had een belangrijker reden om enthousiast te zijn over het proefschrift: 'Der Umstand, dass auch ökonomische Probleme und zwar in einer Richtung behandelt werden, die noch nicht in die Lehrbücher über mathematische Nationalökonomie berücksichtigt werden macht es umso interessanter.'⁴² Ehrenfest had naar aanleiding van Tinbergens proefschrift nog hogere verwachtingen van de toepassing van theoretisch-fysische methoden in de economie. Hij meende dat het proefschrift vanwege het economische aanhangsel alleen al binnen de komende drie tot vier jaar meer en meer gewild zou worden in het buitenland.⁴³ Na zijn promotie ging Tinbergen in het voorjaar van 1929 bij het CBS werken. Dankzij zijn fysisch-wiskundige achtergrond wist hij aan het CBS een belangrijke sprong voorwaarts te maken met de ontwikkeling van zijn model voor de

³⁸ Zie voor Ehrenfests opvattingen over zuiver en toegepast onderzoek: Hollestelle, 'Zuivere praktijk: Paul Ehrenfests opvattingen over toegepaste natuurkunde' (2007) 53-65, m.n. 63-64.

³⁹ Hollestelle, 'Zuivere praktijk: Paul Ehrenfests opvattingen over toegepaste natuurkunde' (2007) 53-65, m.n. 63-64.

⁴⁰ Ehrenfest aan Schumpeter, 22 februari 1931, APE ESC 9, sectie 5; Ehrenfest aan Attwell, 26 mei 1931, APE EPC 1, sectie 3.

⁴¹ Ehrenfest aan Schumpeter, 22 februari 1931, APE ESC 9, sectie 5; Ehrenfest aan Attwell, 26 mei 1931, APE EPC 1, sectie 3.

⁴² Ehrenfest aan Tinbergen, 2 maart 1929, APE ESC 9, sectie 10.

⁴³ Ehrenfest aan Tinbergen, 2 maart 1929, APE ESC 9, sectie 10.

Nederlandse economie.

Ironisch genoeg vormde, afgezien van de statistische aanpak, ook Ehrenfests adiabatiese hypothese een basis voor veel van Tinbergens economische werk, terwijl de geringe weerklank die de hypothese kreeg juist één van de aanleidingen voor Ehrenfest was om zich tot de economische wetenschap te wenden.⁴⁴ Tinbergen was geïnteresseerd in fluctuaties die van binnenuit optraden in economische systemen. Om veranderingen in die (endogene) handelscycli te verklaren gebruikte Tinbergen de adiabatiese methode. Hij nam aan dat de ontwikkeling naar economisch evenwicht – het evenwicht tussen vraag en aanbod – zo langzaam zou zijn, dat hij het evenwicht als een ‘adiabatiese variabele’ kon zien.⁴⁵ Hierdoor kon Tinbergen langzaam variërende variabelen, zoals evenwichtsvariabelen, tijdens berekeningen tijdelijk door constanten vervangen. Dit vereenvoedigde de analyse aanzienlijk, en stelde Tinbergen in staat om een handelbaar model van de Nederlandse economie samen te stellen.⁴⁶

In 1931 vond Tinbergen een voorbeeld van een endogene handelscyclus in de scheepsbouwmarkt.⁴⁷ De scheepsbouw kon worden weergegeven als een ongedempte cyclus met een periode van acht jaar. Tinbergen noemde dit, naar de analogie met de quantummechanica, de ‘eigen trilling’ van het systeem.⁴⁸ Hij zag de mogelijke oplossingen voor een handelscyclus als een eigenwaardeprobleem: het stelsel kon een oneindige hoeveelheid cycli genereren, maar alleen sommige daarvan – de eigenfuncties – zijn economisch acceptabel.⁴⁹ Dit voorbeeld maakte de verklarende en voorspellende kracht duidelijk van Tinbergens aanpak binnen de economie.

In een artikel waarin hij zijn ideeën over de theorie van de handelscycli weergaf, kwam hij wederom terug op de adiabatiese methode van Ehrenfest. Hij stelde dat het mechanisme minstens één dynamische vergelijking moest bevatten en dat het een gesloten systeem

⁴⁴ Zie voor voorbeelden van Tinbergens gebruik van het adiabatiese hypothese: Boumans, ‘Paul Ehrenfest and Jan Tinbergen’ (1993) 131-156.

⁴⁵ Tinbergen, *Les fondements mathématiques de la stabilisation du mouvement des affaires* (1938) 70.

⁴⁶ Boumans, *A case of limited physics transfer* (1992) 54.

⁴⁷ Tinbergen, ‘Ein Schiffbauzyklus?’ (1931) 152-164.

⁴⁸ Boumans, *A case of limited physics transfer* (1992) 59-61; Tinbergen, ‘Ein Schiffbauzyklus?’ (1931) 152-164; Tinbergen, ‘Scheepsbouw en conjunctuurverloop’ (1931) 24-30.

⁴⁹ Boumans, *A case of limited physics transfer* (1992) 53-91.

van vergelijkingen moest zijn. Het aantal vergelijkingen en variabelen kon wel zo groot zijn, dat het praktisch onmogelijk was om het systeem op te lossen. Dit probleem kon men omzeilen door terug te vallen op de zogenaamde macrodynamische methode van Frisch. De keuze van de relevante variabelen is steeds vrij binnen bepaalde grenzen. Sommige grootheden kunnen als constant worden gezien. Hier rechtvaardigde Tinbergen deze uitspraak wederom door te verwijzen naar Ehrenfests adiabatische methode.⁵⁰

Ehrenfest bleef betrokken bij het werk van Tinbergen. Ze bespraken Tinbergens artikelen en gelezen economische boeken en modellen van bijvoorbeeld ruiltheorie.⁵¹ Tekenend is Ehrenfests handelswijze bij een bezoek aan het congres van de pas opgerichte *Econometric Society* te Lausanne. Hij gaf Tinbergen vijfenzeventig gulden uit een geheim fonds om hem in staat te stellen het congres te bezoeken. Achteraf bleek Tinbergen dat het geld afkomstig was van een rekening van Einstein die door Ehrenfest werd beheerd.⁵² Toen Tinbergen aangaf Einstein voor het geld te willen bedanken, drukte Ehrenfest Tinbergen op het hart dat vooral niet te doen. Ehrenfest was alleen gemachtigd om geld van Einsteins rekening te gebruiken ter ondersteuning van de theoretische natuurkunde. En nu had Ehrenfest buiten Einsteins weten diens rekening gebruikt om Tinbergen geld voor te schieten voor nota bene een economisch congres.⁵³

Ehrenfest bleef bijna letterlijk tot aan het eind van zijn leven een zwakke plek houden voor de economische wetenschap. Zo liet hij Tinbergen een bijeenkomst van de *Econometric Society* in Ehrenfests instituut organiseren. De bijeenkomst zou 30 september 1933 beginnen. Op 24 september had Tinbergen nog aan Ehrenfest gevraagd of deze op het congres een verhandeling over harmonische oscillatoren wilde houden. Ehrenfest verkeerde toen echter in zijn diepste depressie en

⁵⁰ Tinbergen, 'Annual survey: Suggestions on quantitative business cycle theory' (1935) 241-308.

⁵¹ Zie bijvoorbeeld in: Tinbergen aan Ehrenfest, 2 november 1928, APE ESC 9, sectie 10; Tinbergen aan Ehrenfest, 18 april 1930; Tinbergen aan Ehrenfest, 21 april 1930; Tinbergen aan Ehrenfest, 31 mei 1931; Tinbergen aan Ehrenfest, 24 januari 1932, APE ESC 10, sectie 1.

⁵² Tinbergen aan Ehrenfest, 25 augustus 1931; Tinbergen aan Ehrenfest, 26 september 1931, APE ESC 10, sectie 1.

⁵³ Ehrenfest aan Tinbergen, 27 september 1931, Tinbergenarchief, ordner 2 (1931-1934).

pleegde zelfmoord op 25 september.⁵⁴ Het congres op het Instituut ging door.

Economie aan hogeschool en universiteit (1)

Met zijn fysische achtergrond ging Tinbergen een heel andere kant op dan gebruikelijk was onder economen. Hierbij moet worden opgemerkt dat ‘economie’ in Nederland vooral ‘staatsuishoudkunde’ betrof, gedoceerd aan rechtenstudenten. In deze paragraaf zal ik laten zien dat de economiebeoefening binnen Nederland na de Eerste Wereldoorlog radicaal begon te veranderen. Van een bijvak voor rechtenstudenten begon staatsuishoudkunde zich te ontwikkelen tot een zelfstandige discipline: de economie.

Al ten tijde van de Frans-Duitse oorlog begaven natuurwetenschappers zich op het terrein van de wetenschappelijke economie. De achtergronden van het ontstaan van de mathematische economie zijn geschetst door de historicus Mirowski. Volgens Mirowski waren er rond 1870 veel wetenschappers en ingenieurs die zich met economie bezighielden. Onder hen bevonden zich de bekende economen Jevons, Walras, Edgeworth, Fisher en Pareto. Ze vergeleken het fysische begrip ‘potentiële energie’ met economische concepten als ‘waarde’ en transponeerden de bekende thermodynamische natuurkunde naar de economie. Het resultaat werd door hen ‘mathematische economie’ gedoopt.⁵⁵ De door hen geïntroduceerde economische methode wordt ook wel aangeduid als de ‘neoklassieke’ of ‘marginale’ economie.⁵⁶ Volgens Mirowski had de volgende generatie neoklassieke economen echter een wiskundige scholing van inferieure kwaliteit.⁵⁷ Deze stelling

⁵⁴ Tinbergen aan Ehrenfest, 24 september 1933, APE ESC 10, sectie 1.

⁵⁵ Mirowski, *More heat than light* (1989) 193-275; Mirowski, ‘The When, the How and the Why of mathematical expression in the history of economic analysis’ (1991) 145-157, m.n. 147-148. Zie voor de achtergronden van de economie ook: M. Schabas, *The natural origins of economics* (2006); Van Maarseveen, Klep, Stamhuis, *The statistical mind in modern society* (2008).

⁵⁶ ‘Marginaal’ slaat hier niet op een eventuele geringe invloed van de neoklassieke economie, maar op het door de neoklassieke economen gehanteerde economische begrip ‘Marginal Utility’ of ‘Marginale waarde’.

⁵⁷ Mirowski, ‘The When, the How and the Why of mathematical expression in the history of economic analysis’ (1991) 145-157, m.n. 149.

valt nogal te nuanceren.⁵⁸ Maar zoals we in het geval van Nederland zullen zien waren veel economen in de eerste plaats rechtsgeleerden die bijvakken staatshuishoudkunde aan rechtenstudenten gaven. Formeel statistisch-mathematische kennis was bij deze groep vrijwel niet aanwezig.

Van oudsher waren staatshuishoudkunde en statistiek bijvakken als aanvulling voor de rechtenstudie aan de juridische faculteit. Hoewel economie in 1876 een verplicht onderdeel werd van het kandidaatsexamen, bleef het vak van ondergeschikt belang. Dat veranderde door initiatieven vanuit het bedrijfsleven. Vanwege de steeds complexer wordende bedrijfsvoering was er bij bedrijven een groeiende behoefte aan een opleiding die studenten voorbereidde op leidinggevende functies in handel en industrie. Het Rotterdamse bedrijfsleven richtte in 1913 de Nederlandsche Handels-Hoogeschool op.⁵⁹ De nadruk op de opleiding lag op de handelspraktijk. Een jaar na de opening werd ook een doctoraalexamen ingesteld, maar dit anticeerde vooral op een eventuele toekomstige behoefte aan lessen handelsonderwijs op middelbare scholen.

De NHH was een succesvol initiatief dat al snel tot navolging leidde. In 1921 werd er aan de Gemeentelijke Universiteit van Amsterdam een Handelsfaculteit opgericht, meer gericht op de wetenschappelijke vorming van toekomstige bedrijfsleiders. Het idee hierachter, onder meer gepropageerd door SDAP-gemeenteraadslid F.M. Wibaut, was dat de juridische opleiding geen goede voorbereiding meer was op leidinggevende functies in het moderne, complexe bedrijfsleven. Naast praktische kennis was een brede, wetenschappelijke scholing nodig om tegemoet te komen aan de eisen van de tijd.⁶⁰ Twee jaar later liet ook de Vereeniging voor Staatshuishoudkunde en Statistiek – die economische onderwerpen behandelde en voor het grootste gedeelte bestond uit juristen⁶¹ – weten dat het economisch onderwijs moest worden uitgebreid. Zowel de omvang als diepgang van de economische studie aan de juridische faculteiten werden als onvoldoende gezien. Van

⁵⁸ Voor een kritische beschouwing op Mirowski's these, zie: De Marchi, *Non-natural Social Science: Reflecting on the Enterprise of 'More Heat than Light'* (1993)

⁵⁹ Wilts, *Economie als maatschappijwetenschap* (1997) 55-56. Zie voor de eisen die de moderne tijd stelde en de reactie daarop door wetenschappers en ingenieurs: Baneke, *Synthetisch denken* (2008).

⁶⁰ Wilts, *Economie als maatschappijwetenschap* (1997) 59-60.

⁶¹ Stamhuis, *Cijfers en Aequaties* (1989) 197, 224.

initiatieven om op de andere (Rijks)universiteiten ook handelsfaculteiten op te richten was echter geen sprake.⁶² Wel werd, na voorbereidend werk vanaf 1924, in 1927 een RK Handels-Hoogeschool te Tilburg opgericht.⁶³ De handelshogescholen hadden, net als de Technische Hoogeschool Delft en de Landbouwhoogeschool Wageningen, het *ius promovendi*.⁶⁴

Het idee dat de juridische opleiding geen goede basis meer vormde voor bestuurders werd mede ingegeven door de visie dat de moderne overheidsbestuurder kennis van wiskunde en natuurwetenschappen moest hebben om bijvoorbeeld op het vlak van complexe economische problematiek slagvaardig te kunnen handelen. In de Eerste Wereldoorlog had de overheid ingegrepen in de economie om deze te stabiliseren. Dit optreden werd als succesvol gezien, en de overheid behield na de oorlog veel invloed in sommige economische sectoren.⁶⁵

Ehrenfest en Tinbergen 'herontdekten' een halve eeuw na de eerder genoemde economen de analogie tussen thermodynamica en economie, wat hen sterkte in het geloof dat introductie van geavanceerde wiskundige methoden de economie tot een exacte wetenschap kon omvormen. Na de veelbelovende start van zijn pupil Tinbergen werd Ehrenfest enthousiast over het omscholen van andere studenten in de natuurwetenschappen tot mathematisch-economen. Niet lang na Tinbergens promotie lanceerde hij een nogal wild plan om andere potentiële Tinbergens binnen de Leidse wis- en natuurkundefaculteit te enthousiasmeren voor de economie.⁶⁶ Daarbij zou moeten worden gekeken of Tinbergen begaafde, maatschappelijk betrokken studenten van de faculteit wis- en natuurkunde kon onderwijzen om in diens voetsporen te treden. Bij systematisch rondkijken in Leiden, Delft en Amsterdam meende Ehrenfest samen met Tinbergen al ongeveer 500 goede mensen te kunnen vinden en opleiden. Er was tot dan toe echter geen mogelijkheid dit soort natuurwetenschappelijke economen via reguliere kanalen op te leiden, met als gevolg dat talloze economen in de dop niet hun juiste bestemming bereikten en onderweg strandden. In een briefje van Ehrenfest aan Tinbergen is zijn frustratie duidelijk te zien:

⁶² Wilts, *Economie als maatschappijwetenschap* (1997) 64-66.

⁶³ *Ibid.*, 66-68.

⁶⁴ Baneke, *Synthetisch denken* (2008) 78-79.

⁶⁵ Baneke, *Synthetisch denken* (2008) 99.

⁶⁶ Ehrenfest aan Tinbergen, 20 maart 1929, APE ESC 9, sectie 10.

Bedenke doch wie absolut verwaarloost diese Möglichkeit bisher ist!!!!!!! Hauptwitz: Feine Menschen, intensives soziales Interesse [und] Verantwortlichkeitsgefühl, mathematische Schulbarkeit und klares Bewußtsein für das neue Schulungs und Arbeitsziel (!!!!) Wie viele „verunglücken“ momentan jährlich in Nederland die vorzüglich für dieses „Tinbergen“ - Ziel wären. Jan – packen wir Beide einmal diese Sache an!! Wirklich, ich sehe eine große Möglichkeit darinn. Bedenke doch wie schlecht selbst Bowley ist und wie enorm die Welt Leute von Keynes-Typus nötig hat (...).⁶⁷

Ehrenfest spreekt van de sociale interesse, het verantwoordelijkheidsgevoel en de mathematische begaafdheid die de beoogde mensen moesten hebben. Hij nam de econoom Keynes als voorbeeld. Die had in Cambridge wiskunde en economie gestudeerd en pleitte in de jaren twintig voor een actieve en sturende rol van de overheid op het gebied van de economie. De overheid speelde volgens hem een sleutelrol in het bevechten van recessies. De wereld had volgens Ehrenfest dringend behoefte aan meer sociaal bevlogen, mathematisch onderlegde economen van het ‘Keynes-type’. Zoals we hierboven hebben gezien waren Ehrenfest en Tinbergen voorstanders van Keynes ideeën betreffende overheidsingrijpen in de economie. Als basis hiervoor was een wiskundige economische wetenschap onontbeerlijk. En die werd tot dan toe niet onderwezen aan de economische hogescholen en universiteiten. Zoals we in het vorige hoofdstuk hebben gezien, was het volgens Ehrenfest juist zaak om dit soort nuttige wetenschap aan de universiteiten te verbinden. Dat onder meer de handelswetenschappen door de universiteiten op afstand werden gehouden, was Ehrenfest een doorn in het oog.⁶⁸

De opleiding van Ehrenfest en Tinbergen

De wetenschappelijke, academische economie was zich in de jaren twintig

⁶⁷ Ehrenfest aan Tinbergen, 20 maart 1929, APE ESC 9, sectie 10.

⁶⁸ Ehrenfest aan familie, 6 juli 1930, APE EPC 1, sectie 8; Ehrenfest aan Kohnstamm, 28 maart 1931, APE ESC 6, sectie 8.

en dertig nog volop aan het vormen. Mede gedreven door de diepe economische crisis zorgden maatschappelijk geëngageerde wetenschappers in de periode 1925-1935 voor een radicale omslag. Een groot aantal natuurwetenschappers en ingenieurs ging zich bezighouden met de mathematische economie. Dat waren wetenschappers als Ragnar Frisch, maar ook Jan Tinbergen en Tjalling Koopmans. Voor het eerst bleven ook veel prominente wiskundigen niet langer aan de zijlijn staan. Onder andere John von Neumann, Griffith Evans, Harold Thayer Davis en Edwin Bidwell Wilson hielden zich – hoe kort soms ook – actief bezig met de economie. Natuurwetenschappers herkenden al aanwezige, bekende wis- en natuurkundige concepten in de neoklassieke economie – die waren er immers vijftig jaar daarvoor door hun collega's ingestopt. Deze herkenning vergemakkelijkte de aansluiting van natuurwetenschappers bij het economisch onderzoek en het toepassen van de nieuwste natuurwetenschappelijke methoden.⁶⁹ In deze periode begon de economie te professionaliseren,⁷⁰ mede gedreven door de roep om de verandering van het economisch bestel.

Ehrenfest en Tinbergen probeerden op bescheiden schaal een informele economische opleiding te starten. In 1929 vroeg Ehrenfest aan Tinbergen om een colloquium te organiseren om 'uns Physikern an ein paar Beispielen den Character derjenigen Probleme sehen zu lassen, wo (eventuell ganz elementare) Mathematische Method offenbar zur Klärung der Fragestellung beitragen können.'⁷¹ Toen de econoom Gilbert in 1931 op uitnodiging van Ehrenfest uit de Verenigde Staten op bezoek kwam, werd hij prompt ingezet voor economische colloquia voor studenten van de Leidse faculteit der natuurwetenschappen.⁷²

Bij Gilbert liet het bezoek zijn sporen na. Achteraf schreef hij aan Ehrenfest: 'Your influence has been felt, I have been working much harder this year than last. Many evenings I am at home, reading and writing. Many ideas are in my mind, and slowly I am developing them until a better understanding results.'⁷³ Hij hield Ehrenfest op de hoogte

⁶⁹ Mirowski, 'The When, the How and the Why of mathematical expression in the history of economic analysis' (1991) 145-157, m.n. 152.

⁷⁰ *Ibid.*, m.n. 147-148.

⁷¹ Ehrenfest aan W.C. Beucker-Andrae, 20 juni 1929, APE ESC:1, sectie 4.

⁷² Ehrenfest aan Schumpeter, 22 februari 1931, APE ESC 9, sectie 5; Ehrenfest aan Attwell, 26 mei 1931, Ehrenfest Archief Leiden, APE EPC 1, sectie 3.

⁷³ H.N. Gilbert aan Ehrenfest, 16 december 1931, APE ESC 4, sectie 8.

van zijn artikelen en vroeg hem ook om commentaar op zijn stukken.⁷⁴

In dezelfde tijd dat Ehrenfest zijn oproep deed aan Tinbergen, wist Ehrenfest al een andere student te interesseren voor de mathematische economie. Het betrof de astronome Johanna Cornelia Thoden van Velzen. Ze werkte als secretaresse en vertaalster voor de hoogleraar astronomie W. de Sitter en nam deel aan Ehrenfests colloquia. Ze had net als Tinbergen een socialistische overtuiging en twijfelde tussen een keuze voor de wetenschap of voor sociaal-maatschappelijk nuttige werkzaamheden.⁷⁵ Ehrenfest maakte haar erop attent dat het niet noodzakelijk was om tussen het één of het ander te kiezen:

Es zeigte sich, dass sie keine Ahnung hatte wie weitgehend sich Wissenschaft und speziell auch mathematisch entwickelte Wissenschaft auf die Klärung sozialer Fragen anwenden lasse. Ich skizzierte ihr das kurz, zeigte ihr ein paar Bücher und Du kannst Dir kaum vorstellen wie glücklich sie war.⁷⁶

De volgende morgen werd Tinbergen naar Leiden geroepen. Hij hield een voordrachtje voor Ehrenfest en Thoden van Velzen, en stelde een werkplan samen om haar de komende maanden de methoden en technieken van de mathematische economie bij te brengen.⁷⁷ Van concreet werk in de mathematische economie kwam echter niets terecht. Eind juni 1929 was Thoden van Velzen vanwege haar huwelijksvoorbereidingen nog niet begonnen aan enig economisch werk.⁷⁸ Het kwam er niet meer van; twee jaar later berichtte ze beschroomd aan Ehrenfest dat ze bij het opruimen van haar bureaula een met stof bedekt economieboek had gevonden dat ze van hem had geleend.⁷⁹ Ze bleef wel actief in wetenschappelijke werkgroepen die in 1931 en 1933 door W. Banning – de latere voorman van de Doorbraakbeweging van net na de Tweede Wereldoorlog – werden

⁷⁴ H.N. Gilbert aan Ehrenfest, 15 december 1932, APE ESC 4, sectie 8.

⁷⁵ Ehrenfest aan Galinka Ehrenfest, 29 maart 1929, APE EPC 1, sectie 7.

⁷⁶ Ehrenfest aan Galinka Ehrenfest, 30 maart 1929, APE EPC 1, sectie 7.

⁷⁷ Ehrenfest aan Galinka Ehrenfest, 30 maart 1929, APE EPC 1, sectie 7.

⁷⁸ J.C. Proost-Thoden van Velzen aan Ehrenfest, 27 juni 1929, APE EPC 5, sectie 5.

⁷⁹ J.C. Proost-Thoden van Velzen aan Ehrenfest, 3 januari 1931, APE EPC 5, sectie 5.

opgezet en waar economische, politieke en levensbeschouwelijke vragen aan de orde kwamen.⁸⁰

Tinbergen bracht de economische opleidingsplannen opnieuw ter sprake in een brief van 16 februari 1930, blijkbaar nadat Ehrenfest in november nogmaals een verregaand voorstel had gedaan voor een opleiding voor 'wiskundige economen-statistici'. Nu was het de beurt aan Tinbergen om wilde plannen te maken. Aanleiding was zijn onlangs geboekte succes in het verklaren van de conjunctuur van de Nederlandse aardappelmeelindustrie.⁸¹ Tot dan toe waren economen daar niet in geslaagd. Het resultaat gaf hem nog meer vertrouwen in de verregaande toepasbaarheid van de mathematische economie. Tinbergen bood aan dit resultaat op het fysisch colloquium van Ehrenfest mee te delen. Sterker dan ooit meende hij dat er mensen in de wiskundige economie gevormd moesten worden. Hij ontvouwde alvast een conceptcurriculum.⁸² Ehrenfest en Tinbergen zouden samen mensen kunnen onderwijzen in theoretische (wiskundige) economie: Ehrenfest zou waarschijnlijkheidstheorie, foutenleer, en correlatierekening kunnen doceren, prof. mr. D. van Blom – hoogleraar staatshuishoudkunde en statistiek te Leiden en aan de Rotterdamse Economische Hogeschool – kon onder andere conjunctuurleer behandelen en Tinbergen zou de stand en werkwijzen van het kwantitatief onderzoek bespreken.⁸³ Ehrenfest was zeer geïnteresseerd en reageerde verheugd op de plannen. De realisering hiervan kon volgens hem wellicht al in het voorjaar van 1931 plaatsvinden, en misschien al in de herfst van 1930. 'Jedenfalls können wir schon jetzt Pläne in einzigen Varianten entwerfen!'⁸⁴ Hij gaf echter ook aan zeer moe en depressief te zijn. Een colloquium was nog eenvoudig te regelen, maar het ontvouwen van een echte opleiding

⁸⁰ Doel was om betreffende deze vragen als deskundige op het eigen vakgebied te opereren, en diletantisme te vermijden door elkaars bevindingen te bespreken. Onder andere waren hierin de pedagoog Langeveld – de belangrijkste leerling van Kohnstamm – en de economen J. Tinbergen en E. van Cleeff, de scheikundige H.R. Kruyt en de astronome J.C. Proost-Thoden van Velzen vertegenwoordigt. Zie: W. Banning aan J. Tinbergen, juni 1931 en 11 september 1933, Tinbergenarchief, ordner 2 (1931-1934).

⁸¹ Tinbergen, 'Het verband tussen den aardappelooft en den prijs en den uitvoer van aardappelmeel' (1930) 18-26.

⁸² Over de opleidingsplannen van Tinbergen, zie ook: Jolink, *Jan Tinbergen* (2003) 74-75. Jolink zegt echter niets van Ehrenfests eerdere initiatief om een dergelijke opleiding te starten.

⁸³ Tinbergen aan Ehrenfest, 16 februari 1930, APE ESC 10, sectie 1.

⁸⁴ Ehrenfest aan Tinbergen, 18 februari 1930, ordner 1A (1926-1930).

dreigde te veel voor hem te worden. Tinbergen raadde hem aan het rustiger aan te doen.⁸⁵

Ehrenfest had niet meer de energie om een economische opleiding op te bouwen. Hij had zelfs de moed al opgegeven om de nieuwe fysica nog te kunnen volgen, laat staan daar aan te kunnen bijdragen. Door allerlei omstandigheden was hij economisch gebonden aan zijn hoogleraarsambt, dat hij anders met liefde had opgegeven. Alle energie van de toch al depressieve Ehrenfest werd opgeslokt door zijn onmogelijke streven de nieuwe fysica toch begrijpelijk te kunnen uitleggen aan zijn studenten. Vandaar dat het van een gezamenlijk gedragen economisch onderwijsprogramma niet meer is gekomen. Bovendien bood de hoogleraar economie aan de gemeentelijke universiteit van Amsterdam, Theo Limperg, Tinbergen in december een baan aan als privaatdocent statistiek aan de faculteit Handelswetenschappen. Tinbergen begon met zijn onderwijs in 1931. In 1933 werd hij benoemd tot buitengewoon hoogleraar statistiek aan de Rotterdamse Economische Hogeschool. Hij kon zijn opleidingsplannen elders gaan realiseren.

Economie op hogeschool en universiteit (2)

Limperg had Tinbergen als privaatdocent aangetrokken, omdat hij een wiskundige benadering miste in het bestaande statistische onderwijs aan de faculteit.⁸⁶ De mathematische statistiek was een verwaarloosde discipline in Nederland.⁸⁷ De expertise op dit gebied bestond wel bij de paar astronomen die in Nederland werkzaam waren.⁸⁸ Tinbergen probeerde aan Limpergs wensen te voldoen en presenteerde zijn vak op wiskundige wijze. Hij trok hiermee geïnteresseerde studenten met een achtergrond in de natuurkunde of de ingenieurswetenschappen. Hieronder bevond zich ook de fysisch Tjalling Koopmans, die in 1933 enthousiast aan Tinbergen schreef dat ook hij wilde overstappen naar de

⁸⁵ Tinbergen aan Ehrenfest, 22 februari 1930, APE ESC 10, sectie 1.

⁸⁶ Jolink, *Jan Tinbergen* (2003) 75-76.

⁸⁷ Alberts, *Jaren van berekening* (1998) 180; Hemelrijk, 'David van Danzig's statistical work' (1959) 335-351, m.n. 335.

⁸⁸ Stamhuis, 'Pearson's Statistics in the Netherlands and the Astronomer Kapteyn' (2009) 96-117; Kuiper, 'In memoriam Prof. Dr. M.J. van Uven 1878-1959' (1959) 255-258.

mathematische economie.⁸⁹ Net als Tinbergen was Koopmans (1910-1985) ervan overtuigd geraakt dat toepassing van natuurwetenschappelijke methoden allerlei problemen in de economie zou kunnen oplossen.⁹⁰ Op 26 november 1936 promoveerde hij bij Kramers, die inmiddels de overleden Ehrenfest was opgevolgd te Leiden.⁹¹ Ook Koopmans promoveerde dus bij een theoretisch fysicus op een proefschrift dat statistiek en economie combineerde: *Linear regression analysis of economic time series*.⁹² Tijdens de Tweede Wereldoorlog emigreerde Koopmans naar de Verenigde Staten, en zette zijn onderzoek met succes voort. In 1975 kreeg hij een gedeelde Nobelprijs voor de economie.⁹³

Over Kramers' motivatie om Koopmans te laten promoveren op een dergelijk onderwerp is niet veel bekend. Vast staat dat Kramers het een 'belangrijke dissertatie' vond.⁹⁴ Kramers en Koopmans verkeerden in dezelfde kringen, wat geïllustreerd wordt door hun gedeelde vriendschap met de socialistische historicus Jan Romein. Bovendien bleef Kramers een sterke band houden met de Leidse fysici. In hetzelfde jaar waarin Koopmans bij hem promoveerde, benadrukte Kramers dat de wetenschap niet moest doorslaan naar enkel en alleen maatschappelijk nut. Hij benadrukte de noodzaak voor zuiver wetenschappelijk onderzoek naast concreet nut.⁹⁵ Zuiver onderzoek vormde in feite de noodzakelijke basis voor goede maatschappelijke toepassingen. We horen hierin duidelijk de

⁸⁹ Jolink, *Jan Tinbergen* (2003) 51-78.

⁹⁰ Charité, *Biografisch Woordenboek van Nederland IV* (1994) 264-266.

⁹¹ Hoewel dit feit vrij algemeen bekend is, is er tot nog toe weinig aandacht geschonken aan de redenen waarom vrij kort na elkaar twee theoretisch fysici aan dezelfde universiteit bij een theoretisch fysicus promoveerden op een economisch proefschrift. Bastiaan Willink wijdt er een kort stukje aan, maar gaat er niet dieper op in: Willink, *De tweede gouden eeuw. Nederland en de Nobelprijzen voor natuurwetenschappen 1870-1940* (1998) 194-198. Wel wordt gewezen op het belang van de fysische achtergrond van Tinbergen, zoals in: Boumans, 'Paul Ehrenfest and Jan Tinbergen: A case of limited physics transfer' (1993) 131-156; Boumans, *A case of limited physics transfer: Jan Tinbergen's resources for re-shaping economics* (1992); Jolink, *Jan Tinbergen* (2003).

⁹² Koopmans, *Linear regression analysis of economic time series* (1936)

⁹³ Charité, *Biografisch Woordenboek van Nederland IV* (1994) 264-266.

⁹⁴ H.A. Kramers, *Laudatio*, uitgesproken op 26 november 1936 bij de promotie van T.C. Koopmans. Bron: http://www.lorentz.leidenuniv.nl/IL-publications/dissertations/kramers_laudatios/koopmans.txt, geraadpleegd op 4 december 2008.

⁹⁵ Baneke, *Synthetisch denken* (2008) 74; Kramers, 'De professor in en buiten de maatschappij' (1936) 365-369.

echo van zijn leermeester Ehrenfest en van vele anderen, zoals ik in het vorige hoofdstuk heb laten zien. Kramers zag de poging van zijn pupil om theoretisch fysische methoden los te laten op economische problemen – net als Ehrenfest – als een zuiver wetenschappelijke exercitie, noodzakelijk om eventueel in een later stadium tot maatschappelijk nuttige resultaten te komen.

In Nederland speelde Ehrenfest een centrale, actieve rol in het tot stand komen van een nieuwe economische wetenschap. Deze wetenschap zou volgens hem in staat zijn maatschappelijke problemen als technische problemen op te lossen. Hij wist bij Tinbergen, Gilbert, Thoden-van Velzen en – indirect – Koopmans belangstelling te wekken voor de mathematische aanpak van maatschappelijke problemen. Aan de hogeschool kon men voor een mathematische aanpak van de economie nog niet terecht, laat staan aan een universiteit. Het waren mathematisch-economisch georiënteerde natuurwetenschappers – met Ehrenfest en Tinbergen voorop – die dit nieuwe vakgebied in Nederland ontgonnen. De mathematische economie begon midden jaren dertig langzamerhand vaste voet te krijgen in de academische wereld, toen duidelijk werd dat de economische crisis die in 1930 opkwam niet van korte duur zou zijn.

Economie en planidee

In Nederland was het economische beleid gedurende de economische crisis van de jaren dertig vooral behoudend. Al te snelle koerswijzigingen werden vermeden om de stabiliteit van de Nederlandse economie te bewaren. De overheid weigerde de overheidsuitgaven te doen stijgen en om de gulden te devalueren.⁹⁶ Dit conservatieve beleid riep kritiek op: vooral vanuit socialistische hoek kwam een steeds sterkere roep om economische en politieke hervormingen.

In deze periode pleitten economen steeds sterker voor meer actieve economische sturing door de overheid.⁹⁷ In 1935 lanceerde de SDAP het *Plan van de Arbeid*, waarin ze pleitte voor een planmatige economische politiek.⁹⁸ De schrijvers van het plan, Tinbergen en

⁹⁶ Wilts, *Economie als maatschappijwetenschap* (1997) 17-18.

⁹⁷ *Ibid.*, 49-55.

⁹⁸ *Ibid.*, 26.

ingenieur Hein Vos, waren van mening dat de gemeenschap het meeste baat zou hebben bij wetenschappelijke leiding.⁹⁹

Het idee dat het overheidsbestel teveel werd gedomineerd door juristen, leefde over een brede linie van natuurwetenschappers en ingenieurs. Natuurwetenschappers en ingenieurs meenden beter in staat te zijn om de complexe, moderne maatschappelijke problemen te analyseren en er oplossingen voor aan te dragen.¹⁰⁰ Voorbeelden van deze wetenschappers zijn Tinbergen, Koopmans, en Ehrenfest. De ingenieur Jan Goudriaan hoorde ook bij deze groep. Goudriaan was hoogleraar aan de Nederlandsche Handels-Hoogeschool in Rotterdam. In 1932 correspondeerde Ehrenfest met dit prominente SDAP-lid. Hij stelde zijn goede vriend Goudriaan enige vragen over de gouden standaarddollar en deflatie, een groot probleem tijdens de crisisjaren.¹⁰¹ Hij spoorde Goudriaan aan de antwoorden op zijn vragen te publiceren. Om de antwoorden op de gecompliceerde kwestie verder te verhelderen stelde hij ook voor om Bohr en Einstein hierbij te betrekken. Dat zou publicatie van Goudriaans idee ten goede komen, aldus Ehrenfest.¹⁰² Einstein en Bohr zagen echter tot zijn teleurstelling slechts een oplossingsmogelijkheid van de crisis in het eenvoudigweg verminderen van het aantal werkzame arbeiders.¹⁰³

Goudriaan schreef in 1933 zijn invloedrijke boek *Socialisme zonder dogma's*. Hierin wees hij nadrukkelijk op de ontoereikendheid van de bestaande economische scholing aan de juridische faculteiten van de universiteiten. Het was zaak om de universitaire studenten voldoende te scholen in 'exact wetenschappelijk denken' en wiskunde, ter voorbereiding op een overheidsoptreden dat meer op interventie was georiënteerd.¹⁰⁴

Het handelsonderwijs begon te veranderen onder invloed van het groeiende belang dat door wetenschappers, ingenieurs en door de handel zelf werd toegekend aan een wetenschappelijke vorming van economen. Al eerder hadden de handelshogescholen het *ius promovendi* verkregen; in

⁹⁹ Ir. H. Vos verdedigde met een dergelijke uitspraak het plan in 1936. Zie: *Ibid.*, 29.

¹⁰⁰ Baneke, *Synthetisch denken* (2008) 98-118.

¹⁰¹ Ehrenfest aan Goudriaan, 12 januari 1932, 25 april 1932, 21 mei 1932, APE ESC 4, sectie 10.

¹⁰² Ehrenfest aan Goudriaan, 12 januari 1932, APE ESC 4, sectie 10.

¹⁰³ Ehrenfest aan Goudriaan, 21 mei 1932, APE ESC 4, sectie 10.

¹⁰⁴ Wilts, *Economie als maatschappijwetenschap* (1997) 52-54.

1918 vond de eerste promotie in de handelswetenschappen plaats aan de NHH, waarna dit slechts enkele malen per jaar werd herhaald. In Amsterdam en Tilburg vonden de eerste promoties respectievelijk plaats in 1928 en 1938.¹⁰⁵ In de jaren dertig kwam meer nadruk te liggen op een zelfstandige wetenschappelijke economische studie. Economie als vakgebied begon zich steeds scherper af te tekenen ten opzichte van de klassieke staatshuishoudkunde of de handelswetenschappen. Tekenend hiervoor is dat in deze jaren de handelshogescholen en de handelsfaculteit allemaal werden omgedoopt tot 'Economische Hoogeschool' en de 'Faculteit der Economische Wetenschappen'. In 1937 werden de economische hogescholen bij wet erkend. Het bijzonder hoger economisch onderwijs kreeg hiermee dezelfde formele status als het universitaire onderwijs. Het onderwijs aan de verschillende instellingen moest tevens aan vergelijkbare eisen voldoen.¹⁰⁶ Dit paste in de algemene trend dat hogescholen en universiteiten naar elkaar toegroeiden.

Aan de instellingen voor hoger onderwijs hadden economen echter vooral een onderwijstaak. De meeste economen volgden de methodiek van de traditionele Oostenrijkse school. Deze was analytisch, maar gekant tegen wiskundig redeneren. Daarnaast bestonden er grote lokale verschillen in materiële en culturele organisatie. Daardoor konden verschillende theoretische stijlen en methodologische voorkeuren gedijen. Dat is terug te zien in de verschillende meningen van economen over de oorzaak en het voortduren van de crisisproblematiek.¹⁰⁷

Vanwege deze verdeeldheid was het mogelijk dat een belangrijke vernieuwing van buiten het hoger onderwijs kwam. Om nieuwe beleidsinstrumenten te ontwikkelen ten behoeve van de nieuwe sociale en economische maatregelen, werd het steeds belangrijker een betrouwbaar beeld van de economische situatie en vooruitzichten te verkrijgen.¹⁰⁸ In 1936 voltooide het CBS een door Tinbergen ontwikkeld 'model' van de Nederlandse economie waarin de samenhang tussen verschillende variabelen wiskundig werd beschreven.¹⁰⁹ Tinbergen koppelde de wiskunde los van de fysica en paste haar ook zonder verwijzingen naar fysische analogieën toe op de economie. Hij gebruikte geen fysisch model voor economische systemen, maar een wiskundig model, dat in zijn

¹⁰⁵ *Ibid.*, 203, noot 153.

¹⁰⁶ *Ibid.*, 82-84.

¹⁰⁷ *Ibid.*, 70-76.

¹⁰⁸ *Ibid.*, 35-36.

¹⁰⁹ *Ibid.*, 36-39.

studie uit 1936 voor het eerst ook 'model' werd genoemd. Ook andere wetenschappers namen de term 'model' in gebruik. In 1940 werd het modelbegrip door Burgers gebruikt voor de beschrijving van complexe turbulentie en grenslaagproblemen. Datzelfde jaar hanteerde tevens de wiskundige David van Dantzig voor het eerst de term 'mathematisch model'. Na de Tweede Wereldoorlog zou het modelbegrip school maken via de econometrie en andere wetenschapsgebieden.¹¹⁰ Tinbergen onderscheidde zich met zijn instrumentalistische opvatting en modellenbouw nadrukkelijk van andere vormen van economiebeoefening in de jaren dertig. Hij maakte zo aanspraak op een nieuwe vorm van deskundigheid.¹¹¹

Tinbergens succesvolle studie leidde tot een belangrijke vernieuwing in het Nederlands economisch denken, namelijk tot het idee dat wiskundige en statistische analyse kon leiden tot het ontwikkelen en ten uitvoer brengen van het economische beleid.¹¹² Hij drukte hiermee een belangrijke stempel op het naoorlogse beleid.¹¹³ Onder leiding van Tinbergen werd de Nederlandse economiebeoefening internationaal toonaangevend. Er was sprake van een internationale 'Tinbergenisatie'.¹¹⁴ Voor zijn invloedrijke werk ontving Tinbergen in 1969 samen met Ragnar Frisch de eerste Nobelprijs voor de economie.¹¹⁵ Ehrenfests bemiddeling en invloed was cruciaal voor Tinbergens (latere) succes, en daarmee op indirecte wijze heel belangrijk voor het naoorlogse economische beleid.

Technocratie

Eind negentiende, begin twintigste eeuw waren ingenieurs betrokken bij normalisatie en standaardisatie van onder meer tijdmeting en

¹¹⁰ Zie voor de ontwikkeling van het modelbegrip: Alberts, *Jaren van berekening* (1998) 107-138.

¹¹¹ Wilts, *Economie als maatschappijwetenschap* (1997) 79.

¹¹² *Ibid.*, 84-85.

¹¹³ Zie voor Tinbergen en het planidee: Somsen, 'Waardevolle wetenschap. Bespiegelingen over natuurwetenschap, moraal en samenleving in de aanloop naar de doorbraakbeweging' (2001) 207-224.

¹¹⁴ Plasmeijer en Schoorl, 'Postwar Dutch economics. Internationalization and homogenization' (2000) 67-93, m.n. 91; Wilts, *Economie als maatschappijwetenschap* (1997) 11.

¹¹⁵ Van Rompuy, *Jan Tinbergen: De eerste Nobelprijswinnaar economie* (1974) 7-13.

maatsystemen, en van productieprocessen en machineonderdelen. Ingenieurs droegen ook bij aan de opkomst van het verschijnsel van de ‘wetenschappelijke bedrijfsleiding’.¹¹⁶ Doel daarvan was om een industrieel productieproces zo efficiënt mogelijk in te richten.

Al snel kwam ook het idee op om rationalisatie toe te passen op hele sectoren van de economie.¹¹⁷ Het begrip ‘deskundige leiding’ stond centraal in veel voorstellen ter bestrijding van de crisis. Deskundige wetenschappers zouden veelvuldig door de overheid moeten worden geraadpleegd om te komen tot een rationele besluitvorming. Ingenieurs en natuurwetenschappers bepleitten een grotere rol in het geven van advies aan de overheid. Niet alleen op economisch vlak, maar op allerlei maatschappelijke terreinen vond het idee van deskundig leiderschap navolging. Menselijke problemen konden net als technische problemen worden opgelost door experts op dat gebied. Ook de pedagoog Philip Kohnstamm – van huis uit een prominent fysicus en nestor van de academische pedagogiek in Nederland – pleitte al vanaf 1918 voor verregaande invloed van deskundige pedagogen bij het tot stand komen van nieuw onderwijsbeleid.

Ehrenfest bewoog zich in de kringen van deze denkers, en droeg in belangrijke mate bij aan hun ideeën. Hij besprak zijn denkbeelden veelvuldig met leerlingen als Tinbergen, maar ook met zijn vrienden Goudriaan, Kohnstamm, en de Amerikaanse fysicus Lewis Tolman.

Deze Tolman was overigens lid van de *Technical Alliance*, een organisatie die aan het einde van de Eerste Wereldoorlog was opgericht. De leden van deze organisatie vonden dat de conventionele economie en de bestaande prijsmechanismen niet de beste garantie vormden voor de verhoging van ieders levensstandaard. Zij zagen de economische crisis dan ook als een teken dat er met het economische systeem iets fundamenteel mis was. De maatschappij moest grondig worden gereorganiseerd op nieuwe, rationele grondslag.¹¹⁸ In 1934 kreeg de *Technical Alliance* in Nederland navolging van het *Technocratisch Verbond*, waarmee meteen de term ‘technocratie’ uit Amerika overwaaide. In Nederland bepleitte iedereen een eigen invulling van het begrip

¹¹⁶ Ehrenfest las hier onder andere over in een Delfts proefschrift uit 1918: Snoep, *Technisch-hygiënische beschouwingen over de economie van den industrielen arbeid* (Leiden 1918); Hierin bevindt zich een hoofdstuk: ‘De tegenwoordige beweging voor “wetenschappelijke bedrijfsleiding”’.

¹¹⁷ Baneke, *Synthetisch denken* (2008) 98-99.

¹¹⁸ *Ibid.*

technocratie.¹¹⁹ De gemeenschappelijke deler was dat wetenschappers en ingenieurs experts waren op diverse gebieden die relevant waren voor de maatschappij. Zij claimden een ‘deskundig leiderschap’. Volgens hen nam de wetenschap een steeds belangrijker rol in de maatschappij in, en waren de moderne problemen te gecompliceerd om zonder deskundigen op te lossen. De politiek zou daarom meer rekening moeten houden met de adviezen van deskundigen.

Ehrenfest voelde zich wel aangetrokken tot vernieuwende initiatieven als die van de *Technical Alliance*. Zijn eerder genoemde geloof dat maatschappelijke problemen kunnen worden opgelost als technische problemen is zo ongeveer de definitie van wat onder technocratie verstaan wordt. Hij was ook zeer geïnspireerd door de inspanningen van wetenschappers in Rusland, die hun land in een ongekend tempo omvormden en industrialiseerden. Hij hoopte dat Europa en Amerika hieruit lering zouden trekken. De leiding moest volgens hem niet aan politici, zakenmensen en militairen, maar aan ingenieurs en wetenschappers worden overgelaten.

Ehrenfest vond hierbij inspiratie in een boek van H.G. Wells, *The World of William Clissold*.¹²⁰ Net als de auteur heeft de hoofdpersoon in het boek zijn geloof in het socialisme verloren. Hij zoekt zijn heil in de wetenschap als middel tot het bereiken van een vreedzame en welvarende toekomst. Wells riep in het boek op tot een ‘Open Conspiracy to reconstruct human life’, door middel van het toepassen van de wetenschappelijke methode op het gehele leven. Het uiteindelijke doel was het opbouwen van een wereldstaat, een enkel systeem van economische productie en sociale samenwerking.¹²¹ Andere voorstanders van dit idee waren de socialistische hoogleraren Kruyt en Burgers. Burgers was net als Ehrenfest een bewonderaar van Wells’ denkbeelden. Wellicht heeft Burgers Wells leren waarderen nadat Ehrenfest in 1915 twee boeken van deze auteur aan *Christiaan Huygens* had gedoneerd.¹²² Na de Tweede Wereldoorlog pleitte Burgers samen met Tinbergen en Kruyt voor een technocratisch, planmatig opererende maatschappij onder

¹¹⁹ Baneke, *Synthetisch denken* (2008) 101-102.

¹²⁰ Ehrenfest aan Van der Pol, 11 november 1931, APE ESC 8, sectie 8.

¹²¹ H.G. Wells, *The World of William Clissold* (1926) 618-629; Zie over de denkbeelden van Wells in dit opzicht: De Wilde en Somsen, ‘Government as Scientific Process in H.G. Wells’ World State’, te verschijnen.

¹²² Notulen Dispuut Christiaan Huygens, Notulenboek F7, 22 februari 1915.

wetenschappelijke leiding.¹²³

Tegenstellingen en (politieke) conflicten konden volgens Ehrenfest door wetenschappelijke methoden worden opgelost. Illustratief hiervoor is zijn opvatting dat Marxistische en kapitalistische systemen elkaar niet uitsloten. Tinbergen nam dit idee van Ehrenfest over.¹²⁴ Tinbergen beschreef dit principe als: 'Het komt zelden voor dat van twee opinies slechts één juist is, en de ander fout. In de meeste gevallen vormen beide deel van de waarheid. Als regel sluiten de twee opinies elkaar niet uit. Vervolgens rijst de vraag "in welke mate elk correct is", oftewel: hoe beide opinies "gecombineerd" moeten worden om het beste beeld van de werkelijkheid te geven'.¹²⁵ Het is opvallend dat zowel Ehrenfest als Tinbergen dit principe hanteerden. Het komt dicht in de buurt van Kohnstamms pluriformiteitsopvatting van de (wetenschappelijke) waarheid, wat niet helemaal vreemd is. Kohnstamm was Ehrenfests boezemvriend, en ook met Tinbergen had Kohnstamm een goed contact. Kohnstamm was ook geïnteresseerd in politiek-economische vraagstukken,¹²⁶ en verkeerde met Tinbergen in dezelfde religieus-socialistische kringen, samen met wetenschappers als Langeveld, Van Cleeff, Kruyt en Proost-Thoden van Velzen.¹²⁷ Een sterke verwantschap heeft het Ehrenfest-principe ook met Bohrs complementariteitsprincipe. Zoals Kohnstamm zijn pluriformiteitsprincipe hanteerde, zo hanteerde de filosofisch georiënteerde Bohr het complementariteitsprincipe zowel binnen als buiten de fysica.¹²⁸ Verder valt de verwantschap op met wetenschappers als Van Dantzig en Mannoury, signifi die er naar streefden iedere vorm van absolutisme te doorbreken. Kohnstamm pleitte, zoals al eerder opgemerkt, voor verregaande bevoegdheden van pedagogen. Hij wees onder meer op de falende Onderwijsraad. Dit college kon alleen maar adviezen aan de minister geven. Pedagogen vormden in de raad slechts een minderheid.

¹²³ Somsen, 'Waardevolle wetenschap. Bespiegelingen over natuurwetenschap, moraal en samenleving in de aanloop naar de doorbraakbeweging' (2001) 207-224, m.n. 207-209.

¹²⁴ Tinbergen, 'Recollections of Professional Experiences' (1988) 67-95, m.n. 67.

¹²⁵ Boumans, 'Jan Tinbergen' (2001) 296-301.

¹²⁶ Kohnstamm aan Tinbergen, 28 april 1931, 13 juni 1931, 11 november 1931, 26 oktober 1933, 18 november 1933, Tinbergenarchief, ordner 2 (1931-1934).

¹²⁷ Zie o.a. W. Banning aan Tinbergen, juni 1931 en 11 september 1933, Tinbergenarchief, ordner 2 (1931-1934). Dit hoewel Kohnstamm geen socialist was en Tinbergen niet religieus.

¹²⁸ Pais, *Niels Bohr's Times* (1991) 420-425, 438-447.

Vaak gaven daarom administratieve, juridische of financiële kanten van een zaak de doorslag, en niet de pedagogische.¹²⁹ Volgens Kohnstamm was dit de reden dat de adviezen van de Onderwijsraad in het Interbellum tot geen concreet resultaat in onderwijswetgeving leidden.¹³⁰ Dit was voor Kohnstamm ontoelaatbaar. Volgens hem konden alleen mensen 'die hun hoofdbezigheid kunnen maken van wetenschappelijke arbeid' op het vlak van de pedagogiek met een dergelijke positie worden belast.¹³¹ Het moest met andere woorden een college van deskundigen worden. Bovendien moesten deze deskundigen meer bevoegdheden krijgen. Zo schreef hij al vlak na de oprichting van de Onderwijsraad in 1919:

Meer en meer breekt zich bij alle deskundigen de overtuiging baan, dat onze tegenwoordige wijze van wetgeving geen gelijke tred kan houden met de behoefte van de moderne staat. Een eenvoudige verandering der werkwijze van de Tweede Kamer is volstrekt onvoldoende; nog minder komt men er met grote woorden aan het adres der Tweede Kamer of der politiek partijen. Men moet het simpele en nuchtere feit onder de ogen zien, dat de moderne staat met zijn enorm aangroeiend arbeidsterrein niet meer voldoende heeft aan één centraal wetgevend lichaam. Andere organen met speciale functies worden dringend vereist. Op het gebied, dat ons thans bezig houdt, zal het zeker moeten komen tot een Onderwijs- of Schoolraad met gans andere, veel verder strekkende bevoegdheid en daardoor ook van gans andere wijze van samenstelling dan degene, die thans zijn taak staat aan te vangen.¹³²

Hoewel Kohnstamm, voormalig voorzitter van de Vrijzinnig Democratische Bond, een progressief liberaal was, begonnen zijn opvattingen tijdens het interbellum steeds linksere trekken te krijgen. We zien vooral in de jaren dertig Kohnstamms liberale ideeën steeds meer veranderen in sociaal-democratische. Hij raakte in de ban van de wetenschappelijke, sociaal-psychologische aanpak van de Belgische

¹²⁹ Mulder, *Beginsel en beroep* (1989) 113.

¹³⁰ Kohnstamm, 'Onderwijs en volksvoorlichting' (1948) 1-45, m.n. 2.

¹³¹ Kohnstamm, 'Onderwijs en volksvoorlichting' (1948) 3-4.

¹³² Kohnstamm, 'De Onderwijsraad' (1919) 878-884, m.n. 883.

socialist Hendrik de Man¹³³ en – net als Ehrenfest en Tinbergen – van de ideeën van de planeconoom Keynes. Planeconomie was volgens Kohnstamm een manier om bronnen van ontevredenheid en extremisme weg te nemen.¹³⁴ Niet zonder reden zou hij zich na de Tweede Wereldoorlog aansluiten bij de nieuwe PvdA. De scheikundige Kruyt was een overtuigd socialist, net als veel ingenieurs die zich in het interbellum richtten op de maatschappelijke toepasbaarheid van wetenschap.¹³⁵

Ehrenfest ventileerde zijn mening omtrent kwesties van crisisbestrijding, deskundig leiderschap en de verhouding zuivere en praktische wetenschap niet in tijdschriften, brochures, pamfletten of tijdens toespraken. Wel sprak hij veelvuldig met andere intellectuelen over deze zaken. Daarin kon Ehrenfest overtuigender zijn dan wie ook. Geen wonder dat andere intellectuelen zoals Goudriaan, Tinbergen, Burgers, Kohnstamm en Idenburg sterk door Ehrenfest werden beïnvloed.

¹³³ Kohnstamm, *Persoonlijkheid in wording* (1929) 509-516; Kohnstamm, 'Arbeidsvreugde' (1927). Hendrik de Man zou in 1933 het 'plan van de arbeid' opstellen, dat als inspiratiebron zou dienen voor het gelijknamige SDAP-plan dat in 1934 werd geschreven door de Jan Tinbergen en Hein Vos. Beide voorstellen pleitten voor een planeconomie.

¹³⁴ Kohnstamm, *Democratie, dictatuur en opvoeding* (1934) 33.

¹³⁵ Baneke, *Synthetisch denken* (2008) 98-118.

Hoofdstuk 7

Internationale contacten

There are few, who like Ehrenfest can bring the people together.

Randall aan Uhlenbeck¹

Wie de inventaris van het Ehrenfestarchief doorbladert, vallen onmiddellijk twee dingen op. Ten eerste het grote aantal geschreven en ontvangen brieven die er in het archief aanwezig zijn, namelijk zo'n zesduizend. Ten tweede het grote aantal correspondenten, namelijk een aantal rond de zeshonderd. Onder hen bevinden zich fysici, chemici en wiskundigen uit Nederland, België, Frankrijk, Engeland, de Verenigde Staten, Noorwegen, Zweden, Finland, Denemarken, Italië, Duitsland, Zwitserland, Oostenrijk, Hongarije, Servië, Griekenland, Polen, Rusland, China en Japan. Ehrenfest correspondeerde met de gehele toenmalige top en subtop van de internationale wis- en natuurkunde, alsmede met een groot aantal jongeren die later zouden uitgroeien tot beroemde fysici.² Dit tekent Ehrenfest als iemand die internationaal in hoog aanzien stond en in binnen- en buitenland een belangrijke rol speelde in de ontwikkeling van de theoretische fysica. In dit hoofdstuk zal ik laten zien hoe Ehrenfest zich gedurende zijn gehele Leidse periode krachtig inzette voor het bevorderen van internationale contacten tussen theoretisch fysici.

Inleiding: internationalisering van de Nederlandse fysica

In de jaren 1870 en 1880 stond er een nieuwe generatie Nederlandse natuurkundigen op die de natuurkunde in Nederland tot grote bloei zou

¹ Geciteerd in: Uhlenbeck aan Ehrenfest, 6 november 1930, APE ESC 10, sectie 2.

² B. Wheaton, *Catalogue of the Paul Ehrenfest Archive at the Museum Boerhaave Leiden* (Leiden 1977).

brengen. Met Van der Waals, Kamerlingh Onnes en Lorentz floreerde de Nederlandse natuurwetenschap als nooit tevoren. Nederlandse wetenschappers slaagden erin aansluiting te vinden bij de nieuwste ontwikkelingen in de internationale natuurkunde. Leiden was hierin hoofdrolspeler.³ Daar kwam Lorentz tot een omvattende elektromagnetische theorie en bouwde Kamerlingh Onnes een goedlopend laboratorium op, met als culminatie het vloeibaar maken van helium en de ontdekking van de supergeleiding.

Aan Nederlandse natuurwetenschappers werd in deze periode een groot aantal Nobelprijzen toegekend. In 1901 ging de allereerste Nobelprijs voor de chemie naar Van 't Hoff. In 1902 kregen Lorentz en Zeeman de Nobelprijs voor de natuurkunde, gevolgd door Van der Waals in 1910 en Kamerlingh Onnes in 1913. Nederland was dan een klein land, maar was wel – zoals dat door de Duitse fysicus Waldemar Voigt werd uitgedrukt – een 'Grossmacht im Gebiete der Physik'.⁴

Tegelijkertijd met de groei van het nationaal prestige was er een groei van het aantal conferenties, projecten en instituten waar nationale wetenschappers elkaar troffen. De grotere rol van internationale congressen lag geheel in de geest van het opkomend nationalisme. Juist door internationale vergelijking met andere naties kon de superioriteit van de eigen nationale onderzoekstraditie worden benadrukt. Een andere reden voor internationalisering lag in gezamenlijk belang, bijvoorbeeld in de noodzaak van standaardisering van wetenschappelijke eenheden, methoden en nomenclatuur. Het aantal internationale wetenschappelijke genootschappen groeide van een handvol rond 1850 tot meer dan vijfhonderd vlak voor de Eerste Wereldoorlog. Het aantal internationale wetenschappelijke conferenties nam toe van één of twee per jaar tot een jaarlijks gemiddelde van wel dertig.⁵ In 1912, het jaar dat Ehrenfest in Nederland arriveerde, was de ontwikkeling van de Nederlandse fysica tot een werkelijk internationale wetenschap nog in volle gang. Zo waren sommige Nederlandse toponderzoekers helemaal niet internationaal gericht, terwijl anderen een vrijwel gelijkwaardige internationale samenwerking aangingen.

Aan het lab van Kamerlingh Onnes bijvoorbeeld, vond al vroeg op vrij grote schaal internationale wetenschappelijke samenwerking

³ Maas, *Atomisme en individualisme* (2001) 38-39.

⁴ W. Voigt, geciteerd in: Van Berkel, *In het voetspoor van Stevin* (1985) 144.

⁵ Schröder-Gudehus, 'Division of labour and the common good' (1982) 3-20.

plaats. Vanaf 1895 kwam een stroom van buitenlandse onderzoekers naar het laboratorium op gang.⁶ Internationale samenwerking stond er zelfs zo hoog in het vaandel, dat het onderzoeksgebied van Kamerlingh Onnes' collega W.H. Keesom ondergeschikt werd geacht aan dat van de vele gastonderzoekers die naar het lab kwamen.⁷

De Nederlandse fysica bevond zich dus niet in een volledig isolement, en er werd door enkele natuurkundigen aansluiting gevonden bij het internationale wetenschappelijke onderzoek. Kamerlingh Onnes bleef echter lange tijd een uitzonderlijk voorbeeld. In zekere zin bleef de Nederlandse natuurkundige gemeenschap tamelijk introvert – zeker op theoretisch gebied. Er werd voor 1900 zelden naar het buitenland gereisd, er werden weinig internationale conferenties bijgewoond en bijna al het werk werd in de *Proceedings* van de KAW gepubliceerd.⁸ De succesvolle theoreticus Van der Waals was een solist met weinig internationale contacten.⁹ Van der Waals jr., die hem in 1908 als theoretisch fysisch opvolgde, had die evenmin. De mathematisch fysisch Lorentz scheen niet erg gebrand op contact met buitenlandse geleerden, totdat dit in 1897 plots veranderde na zijn eerste buitenlandse congres.¹⁰ Hij had daarna vele internationale contacten. Na 1900 kwamen wel meer buitenlanders naar Leiden om met Lorentz te praten, maar desondanks bleef Lorentz net als vele andere Nederlandse fysici denken in termen van de 'vaderlandse fysica'; een eigen nationale stijl van onderzoek doen die gezien werd als superieur aan de Duitse, Franse, Engelse of Amerikaanse stijl van onderzoek.¹¹ De basis van de 'Hollandsche school' werd gevormd door een moleculaire benadering, een nadruk op

⁶ Van Delft, *Heike Kamerlingh Onnes* (2005) 322-324; Van Delft, 'Koude drukte' (2009) 31-52.

⁷ Van Delft, 'Zero-Point Energy: The Case of the Leiden Low-Temperature Laboratory' (2008) 339-361.

⁸ Van Lunteren, 'Wetenschap voor het vaderland' (2004) 43-106, m.n. 76, 83.

⁹ Maas, *Atomisme en individualisme* (2001) 83. Als secretaris van de KAW was Van der Waals er overigens wel verantwoordelijk voor om de verhandelingen van het genootschap vanaf 1898 ook in het Engels te laten verschijnen.

¹⁰ Van Lunteren, 'Wissenschaft internationaliseren' (2006) 25-35.

¹¹ Otterspeer en Schuller tot Peursum-Meijer, *Wetenschap en wereldvrede* (1997) 38; Hoch en Platt, 'Migration and the denationalization of science' (1993) 133-152, m.n. 135-136; Van Lunteren, 'Wetenschap voor het vaderland' (2004) 43-106; Oosterhof, 'De opkomst van een "Vaderlandsche Natuurkunde" aan de Leidse universiteit' (1984) 103-124.

thermodynamica, faseovergangen en grafische representaties, gewoonlijk gebaseerd op de theorieën van Gibbs en Van der Waals.¹²

Het succes van de Nederlandse natuurwetenschap leidde onder wetenschappers tot een sterkere internationale blik. Daarbij is een vergelijking met de Olympische Spelen op zijn plaats. Bij de Olympische Spelen is sprake van een nationaal prestigegevoel als basis voor broederlijke internationale competitie. De basis van Lorentz' internationalisme lag in een krachtig besef van nationale identiteit. Het pas gewonnen wetenschappelijk prestige van het land vormde de grondslag voor zijn inspanningen om voorwaarden te scheppen voor internationale samenwerking en competitie.¹³ Bewust van het Nederlandse succes op natuurkundig gebied, begon hij rond 1900 meer naar buiten te treden. Hij begon congressen te bezoeken, lezingen in onder andere de VS te geven, en hij zat de beroemde Solvay-congressen voor.¹⁴ Daarnaast achtte Lorentz – en velen met hem – Nederland als kleine, militair onmachtige natie voorbestemd voor een arbitrerende rol op het grote internationale podium. Hij spande zich in om te bemiddelen tussen Franse, Engelse en Duitse wetenschappers tijdens en vlak na de Eerste Wereldoorlog.¹⁵

Lorentz hield altijd een wat ambivalente houding ten aanzien van congressen. Natuurkunde betekende volgens Lorentz stille contemplatie, het diep doordenken van natuurkundige problemen. Bij de opening van het Solvay-congres van 1911 merkte hij op dat de vooruitgang in de wetenschap eerder bereikt werd door individuele inspanningen dan de bespiegelingen die op een internationale conferentie werden gemaakt.¹⁶ Zoals we hieronder zullen zien hield Lorentz' opvolger Ehrenfest er een heel andere opvatting op na.

Al spoedig na Ehrenfests komst naar Leiden werd het duidelijk dat zijn visie op internationale samenwerking op een aantal essentiële punten verschilde van die van Lorentz.¹⁷ Net als bijvoorbeeld Bohr had

¹² Oosterhof, 'De opkomst van een "Vaderlandsche Natuurkunde" aan de Leidse universiteit' (1984) 103-124; Van Lunteren, 'Wetenschap voor het vaderland' (2004) 43-106.

¹³ Somsen, 'A History of Universalism' (2008) 361-379; Forman, 'Scientific internationalism' (1973) 154.

¹⁴ Van Lunteren, 'Wissenschaft internationalisieren' (2006) 25-35.

¹⁵ Otterspeer en Schuller tot Peursum-Meijer, *Wetenschap en wereldvrede* (1997)

¹⁶ Van Lunteren, 'Wissenschaft internationalisieren' (2006) 25-35.

¹⁷ Zie hiervoor ook: Van Lunteren, 'Wissenschaft internationalisieren' (2006) 25-35.

Ehrenfest altijd een klankbord nodig om zijn ideeën vorm te kunnen geven. In tegenstelling tot Lorentz was Ehrenfest dan ook van mening dat wetenschappelijke vooruitgang juist tot stand kwam door samenwerking en discussie met vakgenoten. Om die te stimuleren zorgde Ehrenfest dat voor het colloquium in Leiden regelmatig buitenlandse sprekers werden uitgenodigd. Ook opende Ehrenfest een leeszaal voor studenten, met daarin de allernieuwste binnen- en buitenlandse literatuur.

Met deze maatregelen maakte Ehrenfest het voor studenten mogelijk al in een vroeg stadium van de studie kennis te nemen van de nieuwste – internationale – ontwikkelingen. Zoals we hebben gezien voerde hij getalenteerde studenten al in een vroeg stadium de frontgebieden van het internationale onderzoek binnen. Wanneer Ehrenfest meende de student niets meer te kunnen leren, stuurde hij ze voor verdere vorming naar andere leidende centra in de theoretische fysica, zoals Kopenhagen – wat geen traditie was onder de andere Nederlandse fysici. Bovendien zette hij zijn internationale netwerk in om zijn studenten aan een baan te helpen (zie hoofdstuk 2). Deze internationale aanpak bleef niet zonder resultaat. Bijna al Ehrenfests promovendi werden hoogleraar in binnen- of buitenland – dit in tegenstelling tot Lorentz' promovendi, die voor het merendeel leraar werden op de HBS.

Ehrenfests internationale inspanningen gingen ver. Hij zette zich niet alleen in ter wille van Leiden en zijn Leidse studenten. Zoals we zullen zien spande hij zich tot het uiterste in om zijn Amerikaanse en Russische collega's te helpen aansluiting te vinden bij de moderne theoretische fysica. Jonge Amerikaanse en Russische fysici werden door Ehrenfest gestimuleerd en uitgenodigd om naar Leiden te komen voor verdere ontwikkeling; ook met het oog op het profijt dat Leidse studenten en onderzoekers daarvan konden hebben. Wetenschap was voor Ehrenfest synoniem met internationalisme. Ehrenfest zag het dan ook als een groot drama dat de internationale wetenschap tijdens de Eerste Wereldoorlog scheuren begon te vertonen. Hoewel hij aanvankelijk wat wrokkig was ten aanzien van sommige Duitse wetenschappers, stelde Ehrenfest na afloop van de oorlog alles in het werk om de internationale wetenschappelijke samenwerking tussen landen weer op gang te brengen. Toen in 1933 in Duitsland een groot aantal Joodse wetenschappers werd ontslagen, zette Ehrenfest al zijn

internationale contacten in om hulp te bieden. Hij zette het Lorentzfonds in om ontslagen Joodse fysici voor korte tijd naar Nederland te halen.

De Eerste Wereldoorlog en de internationale fysica

Het uitbreken van de Eerste Wereldoorlog zorgde voor een schok binnen de Nederlandse samenleving. Nederland bleef neutraal, en over het algemeen werd juist dit gezien als een teken van sterkte. Onder het Nederlandse volk leefde de opvatting dat Nederland als een van de weinige beschaafde landen zich niet liet meeslepen in de waanzin van de oorlog. Nederlandse wetenschappers wierpen zich op als hoeders van een wetenschappelijke cultuur die in de oorlogvoerende landen verloren dreigde te gaan. De oorlog liet ook de natuurwetenschappers niet onberoerd. Zij trachtten de onderlinge internationale wetenschappelijke contacten tussen de oorlogvoerende naties te behouden. Toen dat niet lukte probeerden Nederlandse natuurwetenschappers na de oorlog met alle macht om de voormalige vijanden op wetenschappelijk terrein weer met elkaar in contact te brengen.¹⁸

Tijdens de oorlog betichtten beide strijdende partijen elkaar van oorlogsmisdaden. Des te erger was het dat ook de intelligentsia van de strijdende partijen zich lieten meeslepen in het conflict. Fysici als Lorentz, Ehrenfest en diens boezemvriend Kohnstamm verzetten zich hiertegen. Volgens Kohnstamm had ieder land een eigen nationale stijl van wetenschapsbeoefening, maar was het verheffen van het vaderland zelf tot hoogste goed een gevaarlijke ontwikkeling.¹⁹ Het Duitse leger had bij haar tocht door België de universiteitsbibliotheek van Leuven platgebrand. Dit was voor binnen- en buitenlandse wetenschappers een schokkende veronachtzaming van het wetenschappelijke cultuurgood, dat aan de gehele mensheid behoorde. Een aantal Nederlandse intellectuelen stuurde een telegram aan de Duitse keizer waarin ze met klem opriepen om dit soort cultuurgoederen voortaan te sparen. Kohnstamm zette zich samen met Gerard Heymans en Frederik van Eeden in voor het pas opgerichte comité 'De Europese Statenbond'. Deze bond beijverde zich om door middel van lezingen en brochures de publieke opinie rijp te

¹⁸ Otterspeer en Schuller tot Peursum-Meijer, *Wetenschap en wereldvrede* (1997)

¹⁹ Hollestelle, 'Beperkte spontaniteit'. *Leven en werk van Philip Kohnstamm* (2004) 48-49.

maken voor haar utopische idealen. Ze stelde een petitie op, gericht aan alle staatshoofden en regeringen. Hierin sprak de bond zich uit tegen de oorlog en voor de wederopbouw van de menselijke cultuur.²⁰

Ondertussen bereikten de wildste verhalen de Nederlandse pers. Krantenberichten konden volgens Ehrenfest niet worden vertrouwd. Om zich tegen de subjectieve berichtgeving te wapenen las hij iedere week in de Leidse universiteitsbibliotheek kranten uit de tijd van de Napoleontische oorlogen, om te constateren dat toen de berichtgeving ook vaak niet deugde.²¹ Om de beschuldigingen aan het adres van de beide partijen te pareren, probeerde Lorentz te fungeren als klein informatiebureau. Hij stuurde publicaties met bijbehorende reacties die daarop binnengekomen waren naar wetenschappelijke collega's in de hoop dat deze tot nuancering van hun opvattingen kwamen.²² Lorentz hoorde van een verhaal dat Duitse militairen de ogen werden uitgestoken door Belgische burgers. Een arts van het Rode Kruis sprak deze beweringen tegen, en Lorentz vond het nodig om het bericht en de verklaring van de arts in Engelse, Duitse en Franse kranten te publiceren. Ehrenfest corrigeerde de Duitse tekst en vertaalde die in het Russisch.²³ Er was Lorentz veel aan gelegen, want het was zaak de wetenschappelijke collega's te laten zien dat men "t ergste liefst gelooft".²⁴ Dat bleek in ieder geval toen Max Born in een brief aan Ehrenfest zijn bezorgdheid uitte. Born hoorde in Duitsland allerhande verhalen over 'kozakken' en 'Aziatische horden' die kleine Duitse stadjes vernietigden en vrouwen en kinderen martelden. Ehrenfest antwoordde scherp, en deelde Born mee hoe de Nederlanders dachten over de Duitse hordes die martelden en Belgische dorpjes vernielden.²⁵ Ehrenfests afschuw voor de oorlog was voor hem reden om het Nederlands staatsburgerschap aan te vragen.²⁶ Ook maakte hij zoals eerder vermeld tijdens de oorlog deel uit van een onderdeel van de burgerwacht. Samen

²⁰ Otterspeer en Schuller tot Peursum-Meijer, *Wetenschap en wereldvrede* (1997) 65-68.

²¹ Ehrenfest aan Galinka Ehrenfest, 8 november 1928, APE EPC 1, sectie 6.

²² Otterspeer en Schuller tot Peursum-Meijer, *Wetenschap en wereldvrede* (1997) 70-71.

²³ Lorentz aan Ehrenfest, 14 september 1914, APE ESC 7, sectie 5; Ehrenfest aan Lorentz, 14 september 1914, Lorentzarchief, toegangsnr. 364, inv. nr. 20; Lorentz aan Ehrenfest, 15 september 1914, APE ESC 7, sectie 5.

²⁴ Lorentz aan Ehrenfest, 8 oktober 1914, APE ESC 7, sectie 5.

²⁵ Born, *My Life. Recollections of a Nobel Laureate* (1978) 162.

²⁶ Lorentz aan Ehrenfest, 4 augustus 1914, APE ESC 7, sectie 5.

met Leidse collega's als De Sitter en Huizinga werd Ehrenfest in de Katwijkse duinen geïnstrueerd in het omgaan met vuurwapens.²⁷

Ehrenfest zag wel enige lichtpuntjes. Zijn vriend Einstein stelde zich neutraal op en Ehrenfest berichtte opgelucht dat Felix Klein zich verre hield van al het chauvinistisch gesteggel. Hij had Klein hulp aangeboden om als doorgeefluik voor internationale correspondentie aangaande Kleins *Encyclopedie* te fungeren.

Op 4 oktober 1914 werd de beruchte *Aufruf an die Kulturwelt* verspreid. Hierin scharden 93 Duitse kunstenaars en wetenschappers, waaronder de bekende fysici Planck, Ostwald, Wundt, Wien en Röntgen, en de beroemde bioloog Haeckel, zich achter de Duitse oorlogsinspanning. Ze namen stelling tegen de beschuldigingen die door de geallieerden jegens de Duitsers werden geuit. Mede door deze sympathieverklaring met de Duitse strijd ontstond er een diepe kloof tussen Duitse wetenschappers enerzijds en Engelse, Franse en Belgische wetenschappers anderzijds. Haeckel gooide demonstratief zijn zilveren Darwin-Wallace-medaille van de *Linnean Society of London* weg. Wat Ehrenfest deed verzuchten dat academische eretekens niet moesten worden behandeld als militaire onderscheidingen. Liefde voor het vaderland, gecombineerd met de haat voor de vijand mocht niet leiden tot het vertroebelen van de wetenschappelijke verhoudingen. Wetenschappers dienden hier buiten te staan. De geleerden zagen volgens Ehrenfest niet in dat geen enkele van de grote naties schuldvrij was.²⁸

'Echt' neutraal kon Ehrenfest zelf overigens niet blijven, zeker niet ten opzichte van de Belg Marcel Minnaert. Als vele andere Flaminganten zag Minnaert in de Duitse bezetting een mogelijkheid om de Waalse hegemonie in het hoger onderwijs te doorbreken. In 1915 kwam deze jonge Belgische bioloog naar Leiden. Wat in Leiden niet bekend was, was dat Minnaert eventueel een post zou kunnen gaan bekleden aan de door de Duitse bezettingsmacht gesteunde Vlaamse universiteit te Gent. Daar de positie voor de biologie al vergeven was, trok Minnaert naar Leiden om zich te bekwamen in de natuurkunde. Hij werd opgenomen in de kring van het echtpaar Ehrenfest, werd lid van *Christiaan Huygens* en raakte innig bevriend met Dirk Coster, Dirk Struik

²⁷ Klein, *Paul Ehrenfest* (1970) 298; Röhle, *Willem de Sitter in Leiden* (2007) 261-262.

²⁸ Ehrenfest aan Lorentz, 4 september 1914, Lorentzarchief, toegangsnr. 364, inv. nr. 20.

(met wie hij samen op kamers woonde), Jan Burgers en Hans Kramers. Ook het colloquium bij Ehrenfest thuis werd door Minnaert bezocht. In januari accepteerde hij een beroep naar Gent en begon hij in Nederland met het werven van leraren voor de nieuwe Gentse hogeschool. Ehrenfest beschouwde dit als heulen met de vijand en weigerde Minnaert nog langer thuis te ontvangen. Ook Kamerlingh Onnes en vele studenten keerden zich van Minnaert af.²⁹ Toen de Duitse fysicus Sommerfeld een bezoek bracht aan de nieuwe, Nederlandstalige universiteit te Gent en zich hier positief over uitliet, zag Ehrenfest zich genoodzaakt Sommerfeld te waarschuwen door te wijzen op het ‘Gequatsch’ waarmee Minnaert en anderen Sommerfeld hadden ingepalmd.³⁰ Vanwege zijn vermeende samenwerking met de vijand moest Minnaert aan het einde van de oorlog naar Nederland vluchten, waar hij in Utrecht een succesvolle carrière opbouwde als astronoom.

Neutraal bleef Ehrenfest evenmin ten opzichte van zijn Duitstalige collega's. Toen hij vernam dat Felix Klein de *Aufruf* mede had ondertekend, sprak hij in een brief aan Klein zijn teleurstelling uit over het feit dat iemand die zich altijd voor internationaal begrip had ingezet zijn naam aan een dergelijk document had verbonden. Hij poogde Klein tevergeefs te bewegen zijn steun aan de *Aufruf* openlijk in te trekken.³¹ Tijdens de oorlog bleef hij wel in contact met collega's als Von Laue, Planck en Sommerfeld, en de in Berlijn werkzame Einstein. Niet helemaal toevallig had geen van deze fysici de *Aufruf* ondertekend – met uitzondering van Planck. Planck had echter door toedoen van Lorentz zijn sympathieverklaring met de Duitse strijd openlijk genuanceerd. David Hilbert nam geen afstand van zijn ondertekening van de *Aufruf*. Toen Ehrenfest in 1918 door Hilbert en Planck werd uitgenodigd voor een bijeenkomst van de Wolfskehl-stichting te Göttingen, bedankte hij voor de uitnodiging, en liet persoonlijk aan Hilbert weten dat hij niet kon komen vanwege zijn afschuw tegen de voortdurende verkrachting van België en zijn sympathie met Russische vrienden en dissidenten in Oostenrijk en Duitsland.³² Einstein nam het voor zijn Duitse collega's op

²⁹ Molenaar, *De rok van het universum. Marcel Minnaert, astrofysicus 1893-1970* (2003) 103-113.

³⁰ Ehrenfest aan Einstein, 27 maart 1918, in: EP 8B, doc. nr. 494.

³¹ Ehrenfest aan F. Klein, juni 1917, zie: Klein, *Paul Ehrenfest (1970)* 307.

³² Ehrenfest aan Einstein, 27 maart 1918, in: EP 8B, doc. nr. 494; Bijkomende handicap was dat het locale Oostenrijkse consulaat weigerde Ehrenfest een paspoort te verlenen (noot 4 & 5 bij doc. nr. 494).

en wees Ehrenfest vanwege zijn 'kinderlijke houding' terecht. Hilbert was volgens Einstein van een kinderlijke naïviteit wat betreft dit soort politieke aangelegenheden. Bovendien had Ehrenfest in plaats van in Leiden net zo goed in Göttingen kunnen zijn aangesteld, en zou ook hij daarmee verantwoordelijk worden gehouden voor de misstanden van Duitsland, aldus Einstein.³³ Ehrenfest hield echter voet bij stuk, ondanks Einsteins kritiek.

Na de oorlog was de strijd op politiek, economisch en wetenschappelijk gebied evenwel nog niet voorbij. Duitsland – al economisch aan de grond – werd gedwongen om binnen twee jaar tijd twintig miljard Mark in goederen af te staan aan herstelbetalingen. Daarna moest nog eens veertig miljard worden afgedragen binnen vijf jaar, en daarna nog eens veertig miljard onder nog nader te bepalen voorwaarden. Op wetenschappelijk vlak ging het niet veel beter. Op 28 juli 1919 werd te Brussel door de geallieerde landen de Conseil International de Recherches opgericht. Het doel van deze vereniging van nationale academies was om de internationale natuurwetenschap nieuw leven in te blazen en krachtiger te maken. Duitsland en Oostenrijk werden echter niet toegelaten tot de CIR. Het was een nadrukkelijk doel van de organisatie om Duitsland – koploper op wetenschappelijk gebied – te vernederen door wetenschappers te weren van internationale congressen en samenwerkingsprojecten. Een aantal neutrale landen werd wel uitgenodigd zitting te nemen in de CIR, waaronder Nederland.

Even dreigde Ehrenfest zelf slachtoffer van de uitsluitingspolitiek te worden. Ehrenfest was in 1920 nog steeds niet genaturaliseerd, en Lorentz voorzag eventuele problemen met Ehrenfests deelname aan het aanstaande Solvay-congres van 1921.³⁴ Op dat congres waren dan ook geen Oostenrijkers en Duitsers aanwezig – de Zwitserse Einstein liet verstek gaan uit solidariteit met zijn Duitse collega's.³⁵ Kennelijk werd voor Ehrenfest een uitzondering gemaakt, want hij woonde het congres wel bij, ondanks het feit dat zijn eigenlijke naturalisatie pas in werking trad op 24 maart 1922.³⁶

Lorentz was van 1910-1921 voorzitter van de afdeling wis- en natuurkunde van de KAW. Hij stond op het standpunt dat de Akademie tot de CIR moest toetreden, juist om zo de positie binnen de CIR te

³³ Einstein aan Ehrenfest, 1 mei 1918, in: EP 8B, doc. nr. 528.

³⁴ Lorentz aan Ehrenfest, 17 december 1920, APE ESC 7, sectie 7.

³⁵ Mehra, *The Solvay conferences on physics* (1975) 95.

³⁶ Casimir, 'Ehrenfest, Paul' (1975) 168-170.

gebruiken om de geallieerden te bewegen Duitsland alsnog toe te laten als lid. De KAW stemde met een krappe tweederde meerderheid voor toetreding tot de CIR.³⁷

De Akademie werd dus lid van de CIR, maar het eigenlijke wetenschappelijke leven speelde zich af in de bij de CIR aangesloten 'unies', die per discipline waren onderverdeeld. Vanwege financiële redenen was de Akademie bij geen van de unies aangesloten. Dat bood een uitweg om de wetenschappelijke samenwerking buiten de CIR om te forceren, bijvoorbeeld toen in 1923 getracht werd de pas opgerichte Nederlandse Natuurkundige Vereniging te laten toetreden tot de Union internationale de physique pure et appliquée. Ornstein, Van Cittert, en Coster waren tegen toetreding van de NNV, omdat ze principieel niet wensten samen te werken met een Union die bepaalde landen buitensloot. De Leidse fysici Ehrenfest, Lorentz, Keesom, De Haas en Fokker gaven te kennen voor toetreding te zijn. Als neutraal land kon men binnen de Union een positieve politiek voeren en de geallieerden bewerken om zo een zo spoedig mogelijke toetreding van Duitsland te bewerkstelligen. Desondanks stemde van de aanwezige leden een kleine meerderheid tegen toetreden – in aanwezigheid van Einstein, die volledig sympathiseerde met het lot van zijn Duitse collega's.³⁸

Daarop namen Ehrenfest, Kamerlingh Onnes, Zeeman, Haga, W.H. Julius en De Haas als KAW-leden van de natuurkunde-afdeling het initiatief om buiten de KAW een comité op te richten. Als KAW- (en dus tevens CIR-) leden waren ze in staat om met de geallieerden samen te werken. Maar omdat ze onafhankelijk opereerden van de Union voor natuurkunde, konden ze ongestoord de uitsluitingclausule van de CIR omzeilen en met de Duitsers samenwerken.³⁹ Volgens hun verklaring aan de Union hadden zij de taak om 'zich bezig te houden met die problemen in de fysica, die de samenwerking zullen vereisen niet alleen van de landen die toegelaten zijn tot de Unie, maar eveneens met de landen die tot op heden van het lidmaatschap zijn uitgesloten, in de wens evenwel

³⁷ Otterspeer en Schuller tot Peursum-Meijer, *Wetenschap en wereldvrede* (1997) 114-116.

³⁸ Notulen algemene vergadering van de NNV, 24 februari 1923; 29 september 1923, archief NNV, doos 1.

³⁹ Otterspeer en Schuller tot Peursum-Meijer, *Wetenschap en wereldvrede* (1997) 125.

dat de belangen van de wetenschap haar zorg zullen opeisen.’⁴⁰ De fysica, zo meenden ze, kon niet zonder het toonaangevende Duitsland. Ze hoopten zodoende een brugfunctie te vervullen tussen de Franse, Engelse en Amerikaanse wetenschappers en hun Duitse collega’s.

Inmiddels werd het langzamerhand wel duidelijk dat wetenschappelijke samenwerking op allerhande vakterreinen toch wel plaatsvond buiten de CIR om.⁴¹ Overigens had de internationale uitsluiting van de centrale landen een direct nadelig effect voor de grootste voorstanders van die uitsluiting. De Fransen hielden halsstarrig vast aan het niet samenwerken met Duitsers en Oostenrijkers. De ontwikkelingen binnen de theoretische fysica volgden elkaar echter snel op en werden vooral schriftelijk of mondeling gecommuniceerd. De Fransen moesten de wetenschappelijke ontwikkelingen in Duitsland via de voormalige neutrale landen vernemen, of via de al uitgekomen Duitstalige artikelen, wat betekende dat ze altijd achterliepen op het leidende onderzoek.⁴² Wellicht dat hierdoor de internationale uitsluiting stilzwijgend werd opgeheven. Werden de Duitsers in 1925 op de helft van alle internationale congressen geweerd, in 1926 gebeurde dat op hooguit een zesde deel van de congressen. In 1927 waren Duitsers en Oostenrijkers als Planck, Born, Schrödinger en anderen weer aanwezig op het Solvay-congres.⁴³ Tien jaar na de oorlog waren de internationale wetenschappelijke verhoudingen genormaliseerd.

Rusland

De oorlog had een nadelig effect op de ontwikkeling van de fysica in Rusland. Ruim voor de oorlog constateerde Ehrenfest al dat Rusland een wetenschappelijke achterstand bezat ten opzichte van West-Europa. Toen Ehrenfest in 1907 naar Rusland verhuisde, merkte hij al snel dat de gevestigde Russische fysici geen aansluiting hadden gevonden bij de moderne fysica. Lange tijd lag binnen de Russische natuurwetenschap de

⁴⁰ Geciteerd in: Otterspeer en Schuller tot Peursum-Meijer, *Wetenschap en wereldvrede* (1997) 125.

⁴¹ Otterspeer en Schuller tot Peursum-Meijer, *Wetenschap en wereldvrede* (1997) 173-181.

⁴² M&R 1.2, 580.

⁴³ Otterspeer en Schuller tot Peursum-Meijer, *Wetenschap en wereldvrede* (1997) 175.

nadruk vooral op herhaling van eerdere experimenten ten bate van het onderwijs, en nauwelijks op eigen onderzoek.⁴⁴ Rusland was geïsoleerd van de toonaangevende Duitstalige landen. Verstoken van goed geïnformeerde fysici nam Ehrenfest het op zich om bij hem thuis – voor het eerst in Rusland – een goedlopend colloquium te beginnen, dat door veel jonge Russische fysici werd bezocht, onder wie V. Bursian, A. Friedman en J. Krutkow – latere specialisten op het gebied van de quantum- en relativiteitstheorie. Vooral met de fysicus Abraham Joffe bouwde Ehrenfest een vriendschappelijke band op. Zijn huiskamer werd zo een brandpunt van de nieuwe fysica in Rusland. Met zijn innovatieve colloquium bracht hij in feite de moderne theoretische natuurkunde naar Rusland.⁴⁵ Zowel zijn kennis als zijn openhartigheid en enthousiasme maakten hem er populair.⁴⁶

Toen Ehrenfest net twee jaar hoogleraar te Leiden was brak de Eerste Wereldoorlog uit, waardoor de contacten van Rusland met het Westen werden verbroken. Pas enkele jaren na de oorlog kon het contact worden hersteld. Al die jaren hadden de Russische fysici het zonder de toonaangevende internationale literatuur moeten doen. Ehrenfest stuurde boeken en tijdschriften op naar Rusland, en riep Nederlandse en buitenlandse collega's als Niels Bohr op om overdrukjes en boeken op te sturen naar Rusland.⁴⁷ Ehrenfest bemiddelde bij het publiceren van artikelen van Russische fysici in toonaangevende Duitse tijdschriften en in de verslagen van de KAW. Overdrukjes van deze artikelen werden geregeld door Ehrenfest zelf opgestuurd aan onder anderen Einstein, Eddington en Pauli.⁴⁸

Ehrenfest verklaarde later dat hij er vanaf 1923 naar streefde om al zijn persoonlijke contacten in dienst te stellen van de ontwikkeling van de Russische fysica en in het bijzonder de jonge Russische fysici.⁴⁹ Zijn inspanningen werden door zijn Russische collega's zeer gewaardeerd.

⁴⁴ Kant, *Abram Fedorovič Ioffe* (1989) 8-21.

⁴⁵ Kant, *Abram Fedorovič Ioffe* (1989) 59.

⁴⁶ Kant, *Abram Fedorovič Ioffe* (1989) 28, 31; Josephson, *Physics and politics in revolutionary Russia* (1991) 32-33.

⁴⁷ Bijvoorbeeld: Bohr aan Ehrenfest, 23 november 1920, APE ESC 1, sectie 6; J.C. Kapteyn aan Ehrenfest, 19 november 1920, APE ESC 6, sectie 5.

⁴⁸ Ehrenfest aan A. Berliner, 16 januari 1930, APE ESC 1, sectie 3; Ehrenfest aan I.E. Tamm, 25 maart 1929, APE ESC 9, sectie 8.

⁴⁹ Ehrenfest aan J.H. de Boer, 25 januari 1930, APE ESC 1, sectie 5.

Ehrenfest als kennismakelaar in Rusland, vroege jaren twintig. Van links naar rechts: Obreimov, Semenov, Ehrenfest, Joffe, Chernyshev.

V.Ia. Frenkel, Leningrad Physics-Technical Institute, courtesy AIP Emilio Segre Visual Archives

Ehrenfest werd in 1924 als corresponderend lid van de Russische Academie van Wetenschappen gekozen. Bij zijn aanbeveling ondersteeppte Joffe het belang dat Ehrenfest had voor de Russische natuurkunde in het algemeen en als grondlegger van de Russische theoretische natuurkunde in het bijzonder.⁵⁰ Vanwege Ehrenfests invloed bij het tot stand komen van de Fysico-Technische Faculteit aan het Polytechnische Instituut te Leningrad werd zelfs het grote feest ter ere

⁵⁰ Kant, *Abram Fedorovič Ioffe* (1989) 59.

van het tienjarig bestaan van de faculteit uitgesteld om Ehrenfest in staat te stellen aanwezig te zijn.⁵¹

Niet alleen de verbetering van de theoretische fysica, maar ook de ontwikkeling van de praktische wetenschap had Ehrenfests warme belangstelling. Zijn Russische boezemvriend Joffe was de initiator van de sterke groei van de Russische fysica in het interbellum. Hij wist steun van de overheid te verkrijgen en in hoog tempo werden allerlei technische instituten uit de grond gestampt, waar vaak baanbrekend onderzoek werd gedaan. Ehrenfest merkte op dat de Russische instituten om de haverklap werden uitgebreid en uitstekend waren uitgerust.⁵² Hij stond Joffe met raad en daad terzijde tijdens de razendsnelle ontwikkeling.

Toen Joffe de Russische quantumfysici Tamm en Mandelstamm naar Leningrad wilde halen, werd hij door Ehrenfest gewaarschuwd. Volgens Ehrenfest was het gevaarlijk om te veel fysici en middelen op een plek te concentreren. Inherent hieraan was het gevaar van stagnatie – een centrale plek zou teveel in zichzelf opgesloten raken. Jonge fysici moesten de kans krijgen om zich aan diverse, gedecentraliseerde plekken wetenschappelijk te kunnen vormen. Talent moest daarom niet in Leningrad blijven hangen, maar zich op meerdere plekken kunnen ontplooiën.⁵³

Ehrenfests woorden kwamen op het juiste moment. Op 5 augustus 1928 werd een groot congres georganiseerd, waaraan vierhonderd fysici – onder wie éénnentwintig westerse coryfeeën – deelnamen. Tekenend was dat Ehrenfest een paar dagen van tevoren afzegde. Hij ervoer het congres als te massaal en hij zou toch niets kunnen bijdragen.⁵⁴ Joffe lanceerde op het congres echter Ehrenfests idee voor ‘decentralisatie’ van de natuurkunde binnen Rusland – in deze opvatting mede gesteund door zijn eigen ervaringen, enige maanden eerder opgedaan tijdens reizen naar Duitsland en de VS. Het plan was om als eerste een soort dependance van het Leningrad Fysico-Technisch Instituut in Charkof te stichten. In dit economische en industriële hart van de Oekraïne zou dit instituut aansluiting kunnen vinden bij de

⁵¹ Ehrenfest aan vrouw en kinderen, 15 december 1929, APE EPC 1, sectie 7.

⁵² Ehrenfest aan F. Zwicky, 7 augustus 1931, APE ESC 10, sectie 10.

⁵³ Ehrenfest aan A.F. Joffe, 13 april 1928, APE ESC 6, sectie 1.

⁵⁴ Ehrenfest aan A.F. Joffe, 8 juli 1928; 24 juli 1928, APE ESC 6, sectie 1; Frenkel, *Yakov Ilich Frenkel. His work, life and letters* (1996) 140-142.

belangrijke industrie die zich in dit gebied bevond.⁵⁵ Tijdens een bezoek aan Leningrad in 1929 brak Ehrenfest een lans voor het in oprichting zijnde Instituut en wist er volgens eigen zeggen een brede groep mensen enthousiast voor te krijgen. Ook werkte hij mee om het instituut van de grond te krijgen.⁵⁶ Naar eigen zeggen had hij een behoorlijk aandeel in de oprichting van het instituut te Charkof.⁵⁷ Charkof werd een leidend centrum voor lage temperatuuronderzoek (dat industriële toepassingen had voor het scheiden van gassen) en theoretische fysica.

Met enige regelmaat maakte Ehrenfest reizen naar Leningrad, Moskou en Charkof om lezingen te geven, zoals in de winter van 1928/29.⁵⁸ In Charkof hield Ehrenfest twee weken lang voordrachten voor de ouderejaars studenten. Hij vroeg daarbij wel om de hulp van Iwanenko en Tamm, die meer werk op het gebied van de golfmechanica hadden gedaan. Zelf vond hij dat zijn kennis van zaken op dit gebied slecht was.⁵⁹ Toen Ehrenfest eind jaren twintig steeds vaker werd geplaagd door depressies en door het gevoel niets zinnigs meer te kunnen bijdragen aan de theoretische fysica, trachtte hij een aantal malen in Rusland en de Oekraïne een baan te krijgen. In 1928 vroeg hij Joffe hem aan te nemen als experimenteel fysicus, zodat hij weer plezier kon vinden in zijn vak door het uitvoeren van eenvoudige proeven en het lesgeven van elementaire natuurkunde aan studenten.⁶⁰

Ehrenfest hoopte daarnaast een rol te kunnen spelen in het onderwijs aan de nieuwe onderzoeksinstellingen, en in het bevorderen van onderlinge contacten. Joffe nodigde Ehrenfest uit om advies te geven inzake de organisatie van het Russische onderwijs in de theoretische natuurkunde.⁶¹ In 1930 sprak Ehrenfest de hoop uit zijn laatste krachten te kunnen 'opgebruiken' bij het aanzwengelen en enthousiasmeren van fysici op de gloednieuwe fysische instituten die inmiddels door toedoen van Joffe her en der in Rusland ontsproten, zoals in Tomsk, Sverdlovsk

⁵⁵ Frenkel, *Yakov Ilich Frenkel. His work, life and letters* (1996) 140-142;

Josephson, *Physics and politics in revolutionary Russia* (1991) 164-165.

⁵⁶ Ehrenfest aan vrouw en kinderen, 4 januari 1929, APE EPC 1, sectie 7;

Ehrenfest aan E. Fermi, 23 februari 1930, APE ESC 4, sectie 3.

⁵⁷ Ehrenfest aan E. Fermi, 23 februari 1930, APE ESC 4, sectie 3.

⁵⁸ Ehrenfest aan broers, 29 september 1929, APE EPC 1, sectie 7.

⁵⁹ Ehrenfest aan A. Leipunski, 2 november 1929, APE ESC 7, sectie 2.

⁶⁰ Ehrenfest aan A.F. Joffe, 26 april 1928, APE ESC 6, sectie 1.

⁶¹ Ehrenfest aan Joffe, 12 maart 1929, 24 december 1931, 24 augustus 1932, APE ESC 6, sectie 3; Van Lunteren, 'Paul Ehrenfest' (2003).

en Dnepropetrovsk.⁶² In 1931 schreef hij aan Joffe dat hij de theoretische natuurkunde niet alleen niet meer kon volgen, maar dat hij het ook niet meer wilde. Hij hoopte door Joffe in Rusland te kunnen worden ingezet om les te geven in de natuurkunde aan toekomstige leraren of beginnende experimenteel fysici. Ook zou hij kunnen worden gebruikt om talenten te signaleren en ze naar leidende Russische centra door te sturen. Het liefste, zo stelde Ehrenfest voor, met steun van twee assistenten.⁶³

In de zomer van 1931 maakte Ehrenfest een lange rondreis door Europa in gezelschap van Dieke, waarbij hij Joffe in Parijs ontmoette. Kort daarvoor had hij zich voorgenomen om het volgende jaar naar Rusland te reizen en te onderzoeken of het mogelijk was om op enige wijze in Rusland een baan te bemachtigen. Hij hoopte in het najaar van 1933 in Rusland een nieuw bestaan op te bouwen.⁶⁴ Maar ook over deze plannen bleef Ehrenfest voortdurend twijfelen. In 1932 schreef hij de fysicus Leipunski dat hij zich oud, ontmoedigd en zonder voorstellingsvermogen voelde. Hij meende niet langer in staat te zijn de Russen zoals vroeger vrolijk aan te moedigen.⁶⁵ Hij twijfelde zelfs aan de mogelijkheid zo verder te leven. Twee dagen later verontschuldigde Ehrenfest zich over zijn depressieve brief. Hij had net bericht gekregen van Joffe. Deze stelde alles in het werk om Ehrenfests werkplan uit 1931 te realiseren. Joffe wilde Ehrenfest wel tussen verschillende Russische onderzoeks- en onderwijsinstututen laten pendelen als docent, klankbord en adviseur.⁶⁶ Een rol, zo merkte Ehrenfest vrolijk op, die hem op het lijf geschreven was.⁶⁷ Eenmaal in Rusland in december 1932, sloeg Ehrenfest het aanbod af. Joffe probeerde Ehrenfest nog ertoe te bewegen een positie te accepteren in Leningrad, Moskou, Kiev of Charkof.⁶⁸ Maar Ehrenfest voelde zich onzeker en bedreigd door het Russisch talent dat al op het instituut rondliep.⁶⁹

⁶² Ehrenfest aan vrouw en dochters, 17 februari 1930, APE EPC 1, sectie 7; Josephson, *Physics and politics in revolutionary Russia* (1991) 163.

⁶³ Ehrenfest aan A.F. Joffe, 10 maart 1931, APE ESC 6, sectie 2.

⁶⁴ Van Lunteren, 'Paul Ehrenfest' (2003).

⁶⁵ Ehrenfest aan A. Leipunski, 20 oktober 1932, APE ESC 7, sectie 2.

⁶⁶ Joffe aan Ehrenfest, 14 oktober 1932, APE ESC 6, sectie 3; Van Lunteren, 'Paul Ehrenfest' (2003).

⁶⁷ Ehrenfest aan A. Leipunski, 22 oktober 1932, APE ESC 7, sectie 2.

⁶⁸ Joffe, *Begegnungen mit Physikern* (1967) 47.

⁶⁹ Kant, *Abram Fedorovič Ioffe* (1989) 73; Joffe, *Begegnungen mit Physikern* (1967) 47; Van Lunteren, 'Paul Ehrenfest' (2003).

Politieke ontwikkelingen hadden een grote invloed op de Russische wetenschap. In 1929 lanceerde Stalin een vijfjarenplan. Rusland moest met vereende krachten en in snel tempo industrialiseren. De landbouw werd gecollectiviseerd, hetgeen grote mislukkingen met zich meebracht. De veestapel kromp tot de helft in. Hoewel de graanproductie redelijk op peil bleef, werd deze getroffen door vordering door de overheid voor het voeden van de grote steden en voor de export. Er ontstond schaarste aan voedingsmiddelen en er brak in de winter van 1932-1933 een verschrikkelijke hongersnood uit. In 1933 riep Ehrenfest zijn collega's in Nederland en in het buitenland op om voedselpakketten te sturen naar de noodlijdende fysici in Rusland, iets dat hij ook in 1922 had gedaan.⁷⁰ Natuurwetenschappers konden vrij ongestoord hun gang gaan.⁷¹ Voor Joffe en zijn collega's werd het wel zaak om aan te tonen dat hun wetenschap in dienst stond van de industrialisatie. Dat was in het geval van de theoretische fysica het moeilijkst, vandaar dat deze werd ondergebracht binnen de fysische tak van de fysisch-technische instituten die in deze jaren onder Joffe's leiding werden opgericht.

De zuivere wiskunde in Leningrad bijvoorbeeld dreigde begin 1930 geheel te worden geëlimineerd vanwege de onvoldoende zichtbare bijdrage aan de industrialisatie van het land. Ehrenfest probeerde de zuivere wiskunde in Leningrad te behoeden voor het ongunstige politieke klimaat. Hij stationeerde twee jonge wiskundigen uit Leningrad bij I. Schur te Berlijn, om doorkneed te raken in de zuivere wiskunde.⁷² Schur was echter maar weinig enthousiast over dit internationale initiatief.⁷³ Van Veblen wist Ehrenfest een gunstige buitenlandse beoordeling over de Russische wiskundigen te krijgen. Veblen kon voor de verdere vorming van de wiskundigen echter geen Rockefeller-beurs krijgen; om in aanmerking te komen moest het initiatief uit het land zelf komen en bovendien was het vereist dat de wiskundigen banen zouden hebben om naar terug te kunnen keren.⁷⁴

⁷⁰ Zie bijvoorbeeld: Ehrenfest aan B. van der Pol, 23 maart 1922, APE ESC 8, sectie 8; Ehrenfest aan Margarethe Bohr, 2 maart 1933, APE ESC 1, sectie 8; Ehrenfest aan S. Goudsmit, 7 maart 1933, APE ESC 5, sectie 1; Ehrenfest aan D. Steinberg, 5 april 1933, APE ESC 9, sectie 7.

⁷¹ Bezemer, *Een geschiedenis van Rusland. Van Rurik tot Brezjnev* (1988) 257-277.

⁷² Ehrenfest aan I. Schur, 15 februari 1930, APE ESC 9, sectie 5.

⁷³ I. Schur aan Ehrenfest, 19 maart 1930, APE ESC 9, sectie 5.

⁷⁴ Ehrenfest aan O. Veblen, 14 februari 1930; O. Veblen aan Ehrenfest, 18 maart 1930, APE ESC 10, sectie 2.

De theoretische fysica kwam in de jaren twintig en dertig onder invloed van het marxistisch-dialectisch materialisme. Quantummechanica en relativiteit waren volgens marxistisch georiënteerde fysici onverenigbaar met de officiële ideologie. V.F. Mitkevich pleitte voor zijn eigen theorie van elektromagnetische krachtlijnen boven de etherloze relativiteitstheorie. In een serie discussies met Mitkevich op het Polytechnisch Instituut te Leningrad probeerden Frenkel, Joffe, Bursian, Lebedinskii en Ehrenfest de studenten voor zich te winnen en de fysica te verdedigen tegen politiek-filosofische inmenging.⁷⁵ Acht maanden later las een bezorgde Ehrenfest een artikel gericht tegen Frenkel, verschenen in het studentenblad van het Polytechnische Instituut. Daarin werd Frenkel hard terechtgewezen voor zijn antimaterialistische oriëntering.⁷⁶ Frenkel liep hierdoor ook toelating tot de Russische Akademie van Wetenschappen – inmiddels omgedoopt tot Akademie van Wetenschappen van de USSR – mis, maar voorlopig bleken de fysici redelijk succesvol in het verdedigen van hun wetenschap. Stalins Grote Terreur zou pas midden jaren dertig toeslaan en vooral Leningrad en de leidende theoretici treffen.

Ehrenfest had een grote bewondering voor wat er in Rusland op allerlei gebied werd getracht te bereiken. Hij merkte op dat in het Polytechnische Instituut te Leningrad voelbaar was hoe alle spieren werden aangespannen om binnen de komende vier jaar het hele land te industrialiseren. In Rusland werd over allerlei problemen met passie gediscussieerd in een tjokvolle collegezaal: over de behandeling van elektrische velden (waarbij Ehrenfest en anderen stelling namen tegen Mitkevich), maar ook over de toestand in de Russische dorpen. Zelfs in de vestibule werd er doorgediscussieerd toen Ehrenfest werd aangeklampt door een grote groep studenten en het tot een discussie kwam over de maatschappelijke rechtvaardiging van het bestaan van universiteiten naast technische instituten. De discussie ging door tot in de kleine uurtjes.⁷⁷ Kortom, in Rusland gebeurden opwindende dingen en stonden grootse ontwikkelingen op stapel. Ehrenfest hoopte vurig dat het vijfjarenplan zou werken. ‘[Dann] wird Russland das gesündeste

⁷⁵ Josephson, *Physics and politics in revolutionary Russia* (1991) 247-275; Ehrenfests verslag van de discussie: P. Ehrenfest aan vrouw en kinderen, 15 december 1929, APE EPC 1, sectie 7.

⁷⁶ Ehrenfest aan familie, 2 augustus 1930, APE ESC 1, sectie 8; Zie ook: Josephson, *Physics and politics in revolutionary Russia* (1991) 114.

⁷⁷ Ehrenfest aan vrouw en kinderen, 15 december 1929, APE EPC 1, sectie 7.

Land der Welt.’⁷⁸ Enige moeilijkheden en mislukkingen waren onvermijdelijk, maar het slagen van de snelle industrialisatie van Rusland lag Ehrenfest na aan het hart. En hij sprak de hoop uit dat het slagen van dit project in Europa de dominerende maatschappelijke rol van politici, kooplieden en militairen zou breken en de weg zou banen voor een leidende rol voor ingenieurs en wetenschappelijke bedrijfsleiders.⁷⁹

Het contact met Rusland was problematisch. Ehrenfest klaagde geregeld over de zeer trage postbezorging en over brieven die onbeantwoord bleven. Ook het regelen van visa voor Russische bezoekers was een terugkerende bron van ongenoegen. Dat was een buitengewoon bureaucratische aangelegenheid. Bijna geen enkel Europees land erkende de Sovjet-Unie, totdat het verdrag van Locarno in 1925 werd getekend. Tot die tijd was het voor Russische fysici vrijwel onmogelijk om visa voor het buitenland te verkrijgen, en ook daarna bleef het moeilijk.⁸⁰ In 1920 moesten Ehrenfest en Lorentz – ondersteund door Zeeman, Onnes en Julius – zich direct wenden tot het Ministerie voor Onderwijs voor een reisvergunning voor de Russische fysici D.S. Rojdestvinsky en A.F. Joffe. Die vergunning kon alleen verleend worden als de Russen zich in Scandinavië of Duitsland bevonden.⁸¹ Uiteindelijk reisde Ehrenfest Joffe dan maar tegemoet en ontmoette hem in Berlijn om een plan op te zetten waardoor de contacten van Russische fysici met het Westen konden worden genormaliseerd.⁸² Pas in juli 1921 was het Ehrenfest gelukt een visum te regelen en bracht Joffe een bezoek aan Leiden.⁸³

Meerdere keren speelde Ehrenfest een visumaanvraag dan ook direct door naar zijn vriend bij het ministerie van justitie, Mr. W.C. Beucker Andreae.⁸⁴ Ook moest Ehrenfest garant staan voor zijn Russische bezoekers. Bij iedere visumaanvraag moest hij verklaren dat de reis een wetenschappelijk doel had en dat de Russische gasten geen

⁷⁸ Ehrenfest aan Tanja Ehrenfest, 5 januari 1930, APE EPC 1, sectie 7.

⁷⁹ Ehrenfest aan B. van der Pol, 11 november 1931, APE ESC 8, sectie 8.

⁸⁰ Josephson, *Physics and politics in revolutionary Russia* (1991) 106.

⁸¹ Lorentz aan Ehrenfest, 17 september 1920, 22 september 1920, 3 oktober 1920, APE ESC 7, sectie 7.

⁸² Josephson, *Physics and politics in revolutionary Russia* (1991) 110.

⁸³ Josephson, *Physics and politics in revolutionary Russia* (1991) 110.

⁸⁴ Zoals voor Joffe en Fock. Zie: Ehrenfest aan W.C. Beucker Andreae, 29 januari 1930; 18 maart 1931, APE ESC 1, sectie 4; Ehrenfest aan A.D. Fokker, 16 juni 1931, APE ESC 4, sectie 5.

politieke propaganda zouden gaan maken tijdens hun bezoek. Soms was het zelfs noodzakelijk om van tevoren het politiebureau te Leiden in te lichten.⁸⁵ Ook was het zaak de Russen van geld te voorzien, want uit Rusland mocht geen geld worden meegenomen.⁸⁶

Tekenend voor de schrijnende visumsituatie is het verhaal van het bezoek van George Gamow. Begin 1929 stapte deze toen nog jonge, onbekende Russische fysicus op de trein naar Nederland. Zoals altijd waren er problemen geweest met het verkrijgen van de juiste papieren, en de jonge Rus wist niet zeker of hij zou worden doorgelaten aan de grens. Vandaar dat hij dit bange vermoeden meldde in een telegram dat hij stuurde naar zijn gastheer. Ehrenfest werd om twee uur 's nachts voor het telegram gewekt en ontstak in blinde woede; deels vanwege het feit dat hij gewekt was, deels uit frustratie vanwege de aanhoudende problemen met uitnodigingen en visa voor Russische collega's. Dit was de spreekwoordelijke druppel. Onmiddellijk belde hij minister-president De Geer, en schopte aan de telefoon een grote rel. Met als resultaat dat naar alle Nederlandse grensposten een telegram werd gestuurd om, wanneer daar een heer G. Gamow verscheen, deze onmiddellijk doorgang te verlenen.⁸⁷

In het voorjaar van 1931 leek de politieke situatie zo te verslechteren dat een reis naar Rusland niet meer met zekerheid leek te plannen.⁸⁸ Ondanks – of juist vanwege – de problemen bleef Ehrenfest zich met hart en ziel inzetten voor zijn Russische collega's. Ook jonge natuurkundigen uit andere Oost-Europese landen hadden Ehrenfests warme belangstelling. In 1913 kwam Krutkow al naar Leiden, die bij terugkeer in Rusland verder onderzoek opzette op het gebied van thermodynamica en Ehrenfests adiabatische invarianten.⁸⁹ Ehrenfest gebruikte het Lorentzfonds om Tamm begin 1928 voor enkele maanden naar Leiden te halen.⁹⁰ In 1931 bracht Tamm een colloquiumbezoek aan Leiden. Tussen 1919 en 1921 waren achtereenvolgens Viktor Trkal, Paul

⁸⁵ Ehrenfest aan V.A. Fock, 20 mei 1928, APE ESC 4, sectie 2; Ehrenfest aan J.H. de Boer, 25 januari 1930, APE ESC 1, sectie 5; Ehrenfest aan B. van der Pol, 9 november 1932, APE ESC 8, sectie 9.

⁸⁶ Ehrenfest aan A.D. Fokker, 16 juni 1931, APE ESC 4, sectie 5.

⁸⁷ Interview met G. Gamow, transcript, 25 april 1968, AIP.

⁸⁸ Ehrenfest aan S. Lefschetz, 23 april 1931, APE ESC 7, sectie 2.

⁸⁹ Frenkel, *Yakov Ilich Frenkel* (1996)

⁹⁰ Ehrenfest aan G. Uhlenbeck en S. Goudsmit, 11 april 1928, APE ESC 10, sectie 2.

Epstein en Georg Breit werkzaam als assistent van Ehrenfest.⁹¹ Trkal was een Tsjech, die na zijn verblijf in Leiden een succesvolle carrière zou opbouwen in Praag. Ehrenfest had de Pool Epstein tijdens diens studie in Rusland leren kennen. In de oorlog had hij bij Sommerfeld baanbrekend werk verricht aan het atoommodel van Bohr. Ondanks zijn groeiende reputatie slaagde hij door zijn Poolse én Joodse achtergrond er maar niet in om een baan in Duitsland te bemachtigen. In 1920 kwam hij naar Leiden als assistent en vervanger van Ehrenfest. Mede door Lorentz' bemiddeling kreeg hij een aanstelling in Pasadena, waar hij de rest van zijn leven zou blijven. Breit was tijdens de oorlog vanuit Rusland naar de VS geëmigreerd. Met een beurs van de National Research Council kwam hij naar Leiden, om in 1921 zijn loopbaan in de VS voort te zetten. De nauwe samenwerking tussen Ehrenfest en Breit leidde tot een aantal gezamenlijke publicaties.⁹² Rond 1913 moet ook de Poolse fysicus Czesław Białobrzęski door Ehrenfest zijn uitgenodigd.⁹³

Jonge Russische fysici reisden graag naar het buitenland om daar kennis te nemen van de nieuwste ontwikkelingen. Velen bleven langere tijd of zelfs permanent in het Westen. P. Kapitza, specialist in lage-temperatuurfysica, bleef vanaf 1921 dertien jaar lang in het Cavendish Laboratory.⁹⁴ Russische theoretisch fysici kregen steun van de International Education Board, opgericht door de Rockefeller Foundation. De IEB gaf geld aan instituten en organisaties als Niels Bohrs Instituut voor Theoretische Fysica en het lage-temperatuurlaboratorium van Kamerlingh Onnes, en tevens aan wetenschappers voor reizen en verblijf in het buitenland. Midden jaren twintig gaf de IEB ook geld voor het leveren van tijdschriften aan Rusland om de oorlog te boven te komen. De IEB was voornamelijk

⁹¹ Van Lunteren, 'Paul Ehrenfest: de Leidse onderzoekschool van een fysicus in diaspora' (2003).

⁹² P. Ehrenfest en V. Trkal, 'Deduction of the dissociation equilibrium from the theory of quanta and a calculation of the chemical constant based on this', *Proceedings AA* 23 (1920) 162-183, *ECP* 40; P. Ehrenfest en G. Breit, 'A remarkable case of quantization', *Proceedings AA* 25 (1922) 2-5, *ECP* 43.

⁹³ Later hoogleraar experimentele natuurkunde te Warschau. Infeld, *Quest* (1980) 160-161; Ziółkowska, *Theoretical physics in Poland before 1939*. Hoewel Infeld in zijn memoires de naam niet noemt, is de identiteit te achterhalen uit het feit dat Infeld een artikel over stralingsdruk uit 1913 noemt en het feit dat de professor was overgestapt van theoretische naar experimentele fysica aan de universiteit van Warschau.

⁹⁴ Josephson, *Physics and politics in revolutionary Russia* (1991) 112.

actief tussen 1923 en 1928.⁹⁵ In maart 1925 bezocht Augustus Trowbridge, directeur Europa voor de IEB, Ehrenfest in Leiden. Op de agenda stonden Ehrenfests plannen om begaafde jonge Russische fysici naar West Europa te halen. Ehrenfest beval Krutkow en Frenkel aan. Frenkel werkte in 1925/26 op Ehrenfests aanraden achtereenvolgens bij Pauli in Hamburg, Einstein in Berlijn en Born in Göttingen. Na terugkomst ontwikkelde hij zich tot leider van een nieuwe generatie theoretisch fysici te Leningrad.⁹⁶ Anderen die door Ehrenfest met een beurs van het Lorentzfonds of de IEB naar het Westen werden gehaald, waren: Tamm (1926), Fock (1927/28) en Landau (1929/30).⁹⁷

Ehrenfest bemiddelde in 1928 voor de jonge Russische fysicus D.V. Skobelzyn om in Parijs bij Marie Curie te gaan werken en in 1931 voor het bezoek van de in Princeton werkende wiskundige S. Lefschetz aan Moskou.⁹⁸ Toen in mei 1933 de Russische wiskundige Kolmogorov met een Rockefeller-beurs naar Göttingen wilde reizen, werd hem dat door de universiteit daar onmogelijk gemaakt. Ehrenfest nam direct contact op met Miller van de Rockefeller Foundation in Parijs om de beurs om te zetten in een ondersteuning voor een verblijf in Parijs.⁹⁹

Ehrenfest werd in 1924 door A.K. Timiriazev gevraagd voor een professoraat aan de universiteit van Moskou. 'Wäre ich allein mit meiner Frau so würde mich der Umstand fascinieren dass ich dort nöthig hier beinahe überflüssig bin.'¹⁰⁰ Hij vroeg of Burgers niet geïnteresseerd was in de aanstelling, hoewel Ehrenfest vurig hoopte dat Burgers binnen Nederland de kans zou krijgen weer naar de theoretische fysica terug te keren. Burgers besloot Russisch te leren en kreeg een jaar later een aanbod van Joffe voor een professoraat in Leningrad als opvolger van de overleden Friedmann.¹⁰¹ Uiteindelijk besloot Burgers niet naar Rusland te gaan. De condities waren daar te onzeker en zijn vrouw had

⁹⁵ Josephson, *Physics and politics in revolutionary Russia* (1991) 112-113.

⁹⁶ Josephson, *Physics and politics in revolutionary Russia* (1991) 113-116; Frenkel, *Yakov Ilich Frenkel* (1996).

⁹⁷ Kant, *Abram Fedorovič Ioffe* (1989) 58-59.

⁹⁸ Ehrenfest aan D.V. Skobelzyn, 16 juli 1928, APE ESC 9, sectie 5, en: Kant, *Abram Fedorovic Ioffe* (Leipzig 1989) 64; Ehrenfest aan L.I. Mandelstamm en I.E. Tamm, 14 maart 1931, APE ESC 7, sectie 10.

⁹⁹ Ehrenfest aan L.E.J. Brouwer, 14 mei 1933, APE ESC 2, sectie 6; Ehrenfest aan H.M. Miller, 13 mei 1933, APE ESC 8, sectie 4.

¹⁰⁰ Ehrenfest aan J. Burgers, 6 juli 1924, AHQP 75.

¹⁰¹ Ehrenfest aan J. Burgers, 10 november 1925, AHQP 75; Alkemade, 'Biography' (1995) xi-cix.

gezondheidsproblemen. Aan Burgers schreef Ehrenfest samen met Coster vooral geïnteresseerd te zijn Burgers terug te winnen voor de fysica om de kar te helpen trekken, en dat ze uitkeken naar een passende positie voor Burgers in Nederland.¹⁰² Uiteindelijk zou Burgers wel een aantal keer naar Rusland afreizen, onder andere voor een verblijf van twee maanden in 1929, waarbij hij een collegereeks gaf.¹⁰³ Ehrenfest probeerde ook collega's als Bohr en Gilles Holst warm te krijgen voor een werkbezoek aan Rusland.¹⁰⁴

Toen Ehrenfest de in Amerika werkzame Zwitserse astronoom Fritz Zwicky – de latere ontdekker van de neutronensterren en de donkere materie, alsmede ‘vader’ van de straalmotor – enthousiast poogde te krijgen voor werk in Rusland, kreeg Ehrenfest nul op het rekest. Ehrenfest had een idyllisch onderzoeksklimaat geschetst, en voegde daar aan toe dat er ‘slechts’ problemen konden ontstaan bij invoer van buitenlands geld of de uitvoer van Russisch geld, of als men kritiek had op het dialectisch materialisme of de partij. Zwicky verklaarde geschokt dat hij nooit onder het dictatoriale Bolsjewisme in Rusland zou willen werken.¹⁰⁵

Ehrenfest speelde ook een rol in het tot stand komen van verdere samenwerking tussen het Leidse kryogene onderzoek en het Russische, onder andere met de fysicus Schubnikof. Deze was van 1926 tot 1930 te gast geweest in het Leidse cryogene laboratorium.¹⁰⁶ Ehrenfest vroeg of Schubnikof weer eens langs kon komen. De Haas had volgens Ehrenfest altijd klaar gestaan om met de Russische fysici samen te werken, en was altijd bereid geweest Obreimof bij de ontwikkeling van het kryogene werk in Charkof behulpzaam te zijn.¹⁰⁷ Schubnikof kwam niet, of kon door de politieke situatie in Rusland niet komen. Wat wel gebeurde, was dat De Haas' steun en toeverlaat bij het experimentele cryogene werk – Eliza Cornelis Wiersma – naar Rusland vertrok. Hoe actief de rol van De Haas in deze was, is onduidelijk, maar hij was in ieder geval bereid om Wiersma voor een lange periode naar Schubnikof te laten gaan.

¹⁰² Ehrenfest aan J. Burgers, 11 juli 1926, AHQP 75; Alkemade, ‘Biography’ (1995) xi-cix.

¹⁰³ J. Burgers aan Ehrenfest, 20 november 1929, APE ESC 2, sectie 7.

¹⁰⁴ Bohr aan Ehrenfest, 14 juli 1928, APE ESC 1, sectie 7; Ehrenfest aan A.F. Joffe, 25 januari 1930, APE ESC 6, sectie 2.

¹⁰⁵ Ehrenfest aan F. Zwicky, 7 augustus 1931; F. Zwicky aan Ehrenfest, 3 september 1931, APE ESC 10, sectie 10.

¹⁰⁶ Van Delft, *Heike Kamerlingh Onnes* (2005) 556.

¹⁰⁷ Ehrenfest aan A.F. Joffe, 2[3] april 1931, APE ESC 6, sectie 2.

Dat had wel wat voeten in de aarde. De Haas stond al eerder – in 1928 – niet te springen om Ehrenfest te steunen in diens aanmoediging om Wiersma naar Rusland te krijgen. Volgens De Haas was een reis naar het buitenland niet verstandig vanwege Wiersma's nierziekte.¹⁰⁸ Toen Wiersma in 1932 wel naar Rusland toog was het zaak voor hem tijdig een passende opvolger te vinden, maar er moest steeds gewacht worden op een uiteindelijke bevestiging van Wiersma's reis. Het gezin Wiersma had intussen hun woning al verlaten en zich in de schulden gestoken. Juist op dat moment, 4 weken voor vertrek en vlak voor de beëindiging van Wiersma's dienstverband in Leiden, kwam uit Berlijn het laconieke bericht dat Wiersma's visum werd geweigerd, ondanks veelvuldige persoonlijke besprekingen in Berlijn, brieven, telegrammen en telefoongesprekken. Het leverde Schubnikof een boze brief van Ehrenfest op.¹⁰⁹ Uiteindelijk moet het goed zijn gekomen, want eind 1932 bezocht Ehrenfest Wiersma te Charkof.¹¹⁰

Het uitlenen van Wiersma aan het buitenland is tekenend voor het internationalisme van de Leidse fysica. Gedurende Wiersma's afwezigheid versloeg de universiteit van Californië te Berkeley Leiden door een nieuw kouderecord te vestigen, hoewel Leiden het record drie maanden later wist te heroveren.¹¹¹ Of dat eerste een direct gevolg was van de afwezigheid van de Leidse experimentele troef Wiersma, is onduidelijk. Het is echter wel duidelijk dat het behalen van nieuwe kouderecords geen prioriteit had.

Uitnodigingen naar Rusland liepen nogal moeizaam. Veel post werd geopend door de Russische censor. De Russische fysicus V.A. Fock werd begin 1931 uitgenodigd in Leiden te komen werken met behulp van het Lorentzfonds.¹¹² Keer op keer kwam er echter geen antwoord uit Rusland. Ook de post tussen Wiersma te Leiden en Schubnikof te Charkof werd onderschept, waardoor communicatie tussen de twee laboratoria onmogelijk werd.¹¹³

¹⁰⁸ W.J. de Haas aan Ehrenfest, 22 juni 1928, APE ESC 5, sectie 3.

¹⁰⁹ Ehrenfest aan L.V. Schubnikof, 21 november 1932, APE ESC 9, sectie 5.

¹¹⁰ Ehrenfest aan A. Leipunski, 19 juni 1932, APE ESC 7, sectie 2.

¹¹¹ Van Delft, *Heike Kamerlingh Onnes* (2005) 554-556; Maas, 'Koud zout' (2006) 264-267.

¹¹² Ehrenfest aan V.A. Fock, 24 mei 1930, APE ESC 4, sectie 3.

¹¹³ Ehrenfest aan A.F. Joffe, 9 juli 1933, APE ESC 6, sectie 3.

Amerika

Op het moment dat Ehrenfest hoogleraar werd in Leiden kende niet alleen Rusland, maar ook Amerika een achterstand op het gebied van de theoretische natuurkunde. Zoals we eerder gezien hebben stonden Amerikaanse universiteiten in het buitenland bekend als pragmatisch en gericht op voor de maatschappij nuttige wetenschap. In de fysica lag een sterke nadruk op een empirische, niet-mathematische aanpak. Een van de weinige succesvolle theoretische fysici was de succesvolle Willard Gibbs, maar deze maakte in eigen land geen school. Vanaf 1910 begonnen Amerikaanse fysici schoorvoetend en vooral experimenteel te werken aan de nieuwe röntgenstralen, radioactiviteit en vanaf 1913 ook aan de quantumtheorie. Vanaf 1919 won de theoretische fysica aan populariteit, mede door de geweldige impact van de experimentele verificatie van Einsteins algemene relativiteitstheorie. De Amerikaanse theoretische natuurkunde lag in de jaren twintig nog steeds achter ten opzichte van Europa, en vooral ten opzichte van het toonaangevende Duitsland. Ook waren er nog maar weinig goedopgeleide theoretisch fysici actief en was de wiskundige basis van veel Amerikaanse fysici ontoereikend.¹¹⁴ Wat ook niet meehielp was dat de nieuwe afleveringen van leidende tijdschriften op het vakgebied niet eerder dan zes weken later dan in Europa in de VS beschikbaar waren. Ook ontbrak het veelal aan de persoonlijke contacten met leidende theoretisch fysici in Europa.¹¹⁵

Maar de Amerikaanse wetenschap was wel in een zeer hoog tempo aan het groeien. Het industrieel fysisch onderzoek nam er vanaf 1900 een hoge vlucht. Het onverwachte succes dat de natuurwetenschap in 1916-1918 oogstte voor de Amerikaanse oorlogsinspanningen, hadden de vruchtbaarheid van het natuurwetenschappelijk onderzoek aangetoond. Met als gevolg dat het makkelijker werd om fondsen te vinden om de fysica aan de universiteiten verder uit te bouwen. Bovendien was er sprake van een groeiend studentenaantal. Voor de industrie waren steeds meer ingenieurs nodig en daardoor ook meer wetenschappelijke staf om deze op te leiden. De opkomst van de quantumtheorie maakte het bovendien wenselijk om goed experimenteel werk te combineren met diepgaande theoretische analyse.

¹¹⁴ Sopka, *Quantum physics in America* (1988) 1-138; Kevles, *The physicists* (1979) 25-90; Servos, 'Mathematics and the physical sciences in America' (1986) 611-629.

¹¹⁵ Sopka, *Quantum physics in America* (1988) 96.

Ehrenfest in zijn element tijdens een discussie aan de University of Michigan, 1930. Van links naar rechts: Maria Goeppert-Mayer, Joseph Mayer, Lars Onsager, Paul Ehrenfest en Robert Atkinson.

AIP Emilio Segre Visual Archives

Aan het California Institute of Technology huurde Robert Millikan de fysicus Richard Tolman in, en hij haalde Paul Epstein uit het buitenland. Millikan zag hierin een mogelijkheid om binnen een paar jaar het Europese fysisch onderzoek in te halen.¹¹⁶ De in de tweede helft van de jaren twintig aangestelde theoretici werden vooral aangesteld ten behoeve van het experimentele werk – vooral de spectroscopie leek relevant voor het verkrijgen van nieuwe inzichten in de quantumtheorie.¹¹⁷ Kosten noch moeite werden gespaard om aansluiting te vinden bij het internationaal leidende theoretisch fysisch onderzoek. Dat gebeurde met zo'n krachtsinspanning, dat het Ehrenfest snel duidelijk werd dat Europa Amerika onmogelijk kon voorblijven. Hij vergeleek Europa met een oude voorname, armer wordende familie, en Amerika met een familie die jong, gezond en vooruitstrevend was.¹¹⁸

¹¹⁶ Kevles, *The physicists* (1979) 155-169, m.n. 169.

¹¹⁷ Schweber, 'The empiricist temper regnant' (1986) 55-98, m.n. 71-72.

¹¹⁸ Ehrenfest aan familie, 6 juli 1930, APE EPC 1, sectie 8.

Onderdeel van de inhaalslag van de Amerikaanse theoretische fysica was het uitnodigen van Europese fysici als gastdocenten. Zoals de Nederlandse astronoom Pannekoek het verwoordde:

‘Steeds opnieuw zoekt men Europese geleerden naar Amerika te halen, hetzij voor een korte serie voordrachten, hetzij voor een jaar, hetzij voor goed, en altijd door ze royaal te betalen, wat bij het Amerikaanse systeem van leven op tal van partikuliere stichtingen en fondsen ook het gemakkelijkst gaat. Ze worden hierheen gehaald, zei een in Amerika wonend Hollander, die dit alles goed kent, om ze uit te pompen; dus om alles aan lering uit hen te halen wat maar kan.’¹¹⁹

Fysici als Sommerfeld, Born – die tijdens een bezoek in november 1925 de nieuwe matrixmechanica in de VS introduceerde¹²⁰ –, Heisenberg, Schrödinger, Joffe, Frenkel, Lorentz, Kramers, Ornstein, en Debye maakten één of meerdere malen een reis naar de VS om daar voordrachten te geven. Ehrenfests manier van kennisoverdracht paste goed bij de Amerikaanse stijl van onderzoek, die gestoeld was op informele discussie en veelal gepaard ging met weinig wiskunde (hoewel dat laatste eind jaren twintig snel veranderde).

In 1922 maakte Millikan het voor Ehrenfest mogelijk om eind 1923 als Research Associate voor drie maanden naar het California Institute of Technology te komen, tegen een royale vergoeding van de National Research Council. Millikan vroeg om een lezingenserie over de belangrijkste en meest recente ontwikkelingen in de natuurkunde. Hij vroeg heel nadrukkelijk *niet* om een collegereeks zoals Lorentz het jaar daarvoor in Pasadena had gegeven. ‘I would suggest that the lectures be primarily a discussion of principles and methods with mathematical processes and technique made as largely incidental as possible.’¹²¹ Dat was Ehrenfest op het lijf geschreven. Het verblijf zou uiteindelijk vijf maanden duren en Ehrenfest sprak daarnaast ook op de universiteiten van California, Minnesota, Columbia en Harvard. De lezingen werden een groot succes. Na een later bezoek schreef een jonge Amerikaan: ‘I wish you could realize what an inspiration you are to us younger men

¹¹⁹ Pannekoek, *Herinneringen* (1982) 270. Met dank aan David Baneke voor het citaat.

¹²⁰ Pais, *The genius of science* (2000) 35.

¹²¹ R.A. Millikan aan Ehrenfest, 22 juni 1922, APE ESC 8, sectie 1.

who are just beginning to get a little of the vision of what physics and chemistry mean.¹²² Ehrenfest had een sterke aantrekkingskracht op de jonge Amerikaanse studenten en met enig genoegen kon hij constateren dat de lange tafel waaraan hij in een cafetaria in Ann Arbor lunchte en dineerde steeds langer werd, omdat steeds meer jonge Amerikanen erbij wilden zitten om mee te discussiëren. De eigenaar van de zaak hield de tafel gereserveerd met een speciaal bordje: 'For Prof. Ehrenfest and his family.'¹²³

Ehrenfest maakte twee reizen naar de VS; in 1923/1924 en in 1930. Beide malen verspreidde het nieuws dat Ehrenfest de Verenigde Staten zou bezoeken zich als een lopend vuurtje door de Amerikaanse natuurkundige gemeenschap. General Electric nodigde Ehrenfest uit voor het bezoeken van het laboratorium en het geven van enkele lezingen over de nieuwste ontwikkelingen in de fysica van het atoom.¹²⁴ Toen Amerikaanse fysici lucht kregen van een komend tweede bezoek in 1930, werd Ehrenfest uitgenodigd om Swarthmore College te Pennsylvania te bezoeken. Ehrenfest had hier wel oren naar, omdat het ook hier weer ging om colloquia in plaats van formele lezingen. De uitnodiging vermeldde dat informele colloquia door Amerikaanse fysici geprefereerd werden als methode voor de ontwikkeling en overdracht van kennis.¹²⁵ In 1930 gaf Ehrenfest onder meer lezingen aan het MIT, Harvard en aan Cornell.¹²⁶ Tolman benadrukte bij zijn uitnodiging voor een bezoek aan het California Institute of Technology: 'I hope that you will lecture on the quantum mechanics, with special emphasis on fundamentals and simple applications, in the way that you do so well. We hear so much about complicated applications from people who do not understand the fundamentals, that it will be a happiness to have you with us.'¹²⁷

¹²² D. Andrews aan Ehrenfest, 23 september 1930, APE ESC 1, sectie 1.

¹²³ Ehrenfest aan vrouw en kinderen, 21 juli 1930, APE EPC 1, sectie 8.

¹²⁴ G.M.J. MacKay aan Ehrenfest, 29 augustus 1922, APE ESC 7, sectie 10; I. Langmuir aan Ehrenfest, 5 november 1923, APE ESC 7, sectie 1.

¹²⁵ F.W.G. Swann aan Ehrenfest, 13 maart 1929; Ehrenfest aan F.W.G. Swann, 20 april 1929; F.W.G. Swann aan Ehrenfest, 15 oktober 1929, APE ESC 9, sectie 7.

¹²⁶ T. Lyman aan Ehrenfest, 6 november 1930, APE ESC 7, sectie 10; J.C. Slater aan Ehrenfest, 7 november 1930, APE ESC 9, sectie 5; E. Merritt aan Ehrenfest, 5 december 1930, APE ESC 8, sectie 1.

¹²⁷ R.C. Tolman aan Ehrenfest, 30 juli 1930, APE ESC 10, sectie 2.

Ehrenfest verzorgde in 1930 ook een Summerschool in Ann Arbor. Uhlenbeck had Ehrenfest bij zijn uitnodiging op het hart gedrukt dat zijn aanwezigheid aldaar nodig was. Niet zijn lezingen, of zelfs niet zijn fysica, naar vooral de inspiratie die van Ehrenfest uitging, en zijn manier van doen en de atmosfeer die dit met zich meebracht, waren zeer gewenst om de jonge fysici in de VS te stimuleren.¹²⁸ Tijdens en na zijn reizen werden veel jonge Amerikaanse fysici door Ehrenfest gestimuleerd om naar Leiden te komen of om andere Europese centra te bezoeken. Vaak ondersteunde Ehrenfest hen hierin met een beurs. Natuurkundigen die zo voor kortere of langere tijd naar Nederland kwamen, waren Oppenheimer, Elsasser, en Kronig. Hun bezoeken zullen in het volgende hoofdstuk nader worden bekeken.

Ehrenfest was zeer enthousiast over het idee om de VS te bezoeken, maar zag ook op tegen de voordrachten die hij er diende te houden. Tijdens zijn eerste bezoek durfde hij in eerste instantie alleen goed bekende zaken kritisch te bespreken. Daar was op dat moment het meest behoefte aan in Amerika, en dat was tevens wat hij het beste kon.¹²⁹ Nadat hij zijn eerste plankenkoorts overwonnen had sprak Ehrenfest ook over gloednieuwe ontwikkelingen in zijn expertisegebied van de quantumstatistiek.¹³⁰ Bovendien publiceerde hij tijdens zijn eerste verblijf drie gezamenlijke artikelen met respectievelijk Paul Epstein, Richard Tolman en de wiskundige Harry Bateman.¹³¹ Voor zijn bezoek in 1930 meende Ehrenfest nog veel nieuwe dingen te moeten leren, en het viel hem buitengewoon zwaar zich de nieuwe ontwikkelingen eigen te maken.¹³² Hij werd door paniek overvallen wanneer hij eraan dacht om lezingen te moeten gaan verzorgen.¹³³ Maar ook tijdens dit verblijf was

¹²⁸ G.E. Uhlenbeck aan P. Ehrenfest, 5 maart 1930, APE ESC 10, sectie 2; Klein, 'Physics in the making in Leiden: Paul Ehrenfest as teacher' (1989) 29-44, m.n. 41-42.

¹²⁹ Ehrenfest aan Tatjana Ehrenfest, 11 januari 1924, in: Klein, 'Osservando l'America: la visita di P. Ehrenfest negli USA' (1985) 9-24.

¹³⁰ Sopka, *Quantum physics in America* (1988) 89.

¹³¹ P.S. Epstein en P. Ehrenfest, 'The quantum theory of the Fraunhofer diffraction', *Proceedings NAS* 10 (1924) 133-139 (*ECP* 53); P. Ehrenfest en R. C. Tolman, 'Weak quantization', *Physical Review* 24 (1924) 287-295 (*ECP* 54); H. Bateman en P. Ehrenfest, 'The derivation of electromagnetic fields from a basic wave-function', *Proceedings NAS* 10 (1924) 369-374 (*ECP* 55).

¹³² Ehrenfest aan Tanja Ehrenfest, 27 oktober 1929, APE EPC 1, sectie 7.

¹³³ Ehrenfest aan Randall, 21 april 1930, APE ESC 8, sectie 9.

Ehrenfest productief en schreef hij artikelen met Tolman, Oppenheimer en Podolsky.¹³⁴

Toen hij eenmaal op gang was gekomen, voelde Ehrenfest zich in Amerika als een vis in het water. Terug in Nederland verviel hij echter al weer snel in depressieve stemmingen. Ehrenfest voelde er wel voor om zijn positie in Leiden aan een jongere kracht over te laten en naar de VS te gaan. In april 1929 kwam een plek open voor een quantumfysicus aan de Ohio State University. A.W. Smith, de voorzitter van het departement natuurkunde, wilde iemand uit Europa aannemen. Toen hij hoorde dat Ehrenfest de zomer van 1930 naar Michigan kwam, nodigde hij hem prompt uit om eerder te komen en achtereenvolgende maanden te helpen de theoretische fysica aan Ohio State University op poten te zetten voor een slordige 9.000 dollar. Ehrenfest zei niet op dit aanbod in te kunnen gaan, omdat hij niet op tijd weg kon komen vanwege facultaire verplichtingen.¹³⁵ Ehrenfest heeft daarna een aantal keer bijna een positie in de VS weten te bemachtigen. Uiteindelijk waren zijn kansen op een baan verkeken door de crisis. Aan de University of Cincinnati was men door Ehrenfest enthousiast gemaakt om een afdeling theoretische natuurkunde op te starten waar hij kon komen werken, maar de noodzakelijke fondsen ontbraken.¹³⁶ Ook de University of California te Los Angeles was enthousiast en vol goede bedoelingen, en erg teleurgesteld dat ze geen geld konden vinden om Ehrenfest aan de universiteit te verbinden.¹³⁷ Het lijkt erop dat Ehrenfest ook heeft geprobeerd op Swarthmore College te Pennsylvania een baan te krijgen, maar ook dit lukte niet vanwege de economische omstandigheden.¹³⁸

Toen Ehrenfest in 1930 en 1931 een half jaar in de VS verbleef, ontstond er een plan om hem in het oosten van de VS aan te stellen. Volgens Ehrenfest was het plan bijna gerealiseerd en zou hij genoeg geld voor zichzelf en twee assistenten krijgen. Maar eigenlijk wilde hij het

¹³⁴ P. Ehrenfest en R. C. Tolman, 'Temperature equilibrium in a static gravitational field', *Physical Review* 36 (1930) 1791-1798 (*ECP* 71); P. Ehrenfest en J. R. Oppenheimer, 'Note on the statistics of nuclei', *Physical Review* 37 (1931) 333-338 (*ECP* 72); R. C. Tolman, P. Ehrenfest, B. Podolsky, 'On the gravitational field produced by light', *Physical Review* 37 (1931) 602-615 (*ECP* 73).

¹³⁵ A.W. Smith aan Ehrenfest, 10 april 1929; A.W. Smith aan Ehrenfest, 23 mei 1929; Ehrenfest aan A.W. Smith, 4 juni 1929, APE ESC 9, sectie 5.

¹³⁶ Donald Andrews aan Ehrenfest, 23 september 1930, APE ESC 1, sectie 1.

¹³⁷ S.J. Barnett aan Ehrenfest, 3 februari 1931, APE ESC 1, sectie 2.

¹³⁸ A. Dresden aan Ehrenfest, 22 januari 1932, APE ESC 3, sectie 7.

liefst in California werken. Vandaar dat Ehrenfest aan Tolman vroeg nog eens te informeren of een dergelijk plan ook niet daar kon worden gerealiseerd.¹³⁹ Ook deze plannen vielen in duigen. De eerste drie maanden van 1933 probeerde Undine Bradley haar goede vriend Ehrenfest aan een baan op een lagere school [*sic*] in California te helpen. Dat zou een betrekkelijk makkelijke taak zijn voor de zwaar depressieve Ehrenfest. Bovendien kon Ehrenfest dan toch contact houden met de fysici in Pasadena. De depressie die Ehrenfest doormaakte werd ondraagelijk, en hij zag het als haast onmogelijk om de komende drie maanden door te komen. Hij vroeg Bradley hem uit zijn hel te verlossen. Hij bleef hoop houden, die echter ijdel bleek. Er werd geen geld gevonden om Ehrenfest aan te stellen.¹⁴⁰

Joodse vluchtelingen in 1933

Liepen Rusland en de Verenigde Staten achter wat betreft grote delen van de natuurwetenschap, de Duitse natuurwetenschap was vanaf de negentiende eeuw al toonaangevend. Ter illustratie: van alle Nobelprijzen op het gebied van natuurwetenschap die tussen 1901 en 1932 werden uitgereikt, gingen er maar liefst 33 naar Duitse wetenschappers of wetenschappers die in Duitsland werkzaam waren. In Groot-Brittannië werden 18 prijzen uitgereikt, in de Verenigde Staten 6. Van de Duitse winnaars was overigens ongeveer een kwart van Joodse afkomst, terwijl de Joodse gemeenschap niet meer dan één procent van de Duitse bevolking uitmaakte.¹⁴¹

Volgens Ehrenfest was dat zeker geen toeval. De Joodse Ehrenfest voelde een sterke verbondenheid met andere Joodse wetenschappers. Hij was trots op het succes van de Joden binnen zoveel uiteenlopende beroepen. ‘Und immer wieder fühlte ich, dass “das Holz aus dem wir geschnitten sind” zu den allerbesten Sorten gehört.’¹⁴² Ook binnen de theoretische fysica was hun succes evident. Het verhaal doet de ronde dat Ehrenfest ooit starend naar een portret van de door hem bewonderde Lorentz werd gevonden, terwijl hij mompelde: ‘Het moet er

¹³⁹ Ehrenfest aan R. Tolman, 3 februari 1931, APE ESC 10, sectie 2.

¹⁴⁰ Ehrenfest aan U. Bradley, 29 januari 1933, 22 februari 1933, 9 maart 1933; U. Bradley aan Ehrenfest, 29 maart 1933, APE EPC 1, sectie 4.

¹⁴¹ Medawar en Pyke, *Hitlers geschenk* (2001) 17.

¹⁴² Ehrenfest aan Einstein, 28 oktober 1930, APE ESC 3, sectie 9.

een van ons zijn, het moet er een van ons zijn.’ Op een bepaald moment was hij teleurgesteld in de prestaties van zijn student Casimir. Hij merkte toen schertsend op dat Casimirs prestaties ongetwijfeld beter zouden zijn geweest wanneer er ook maar een fractie Joods bloed door zijn aderen zou vloeien.¹⁴³

In Wenen had Ehrenfest veelvuldig met antisemitisme te maken gehad. De eveneens in Wenen geboren Joodse natuurkundige Victor Weisskopf zei eens dat men als Jood vanwege het antisemitisme in Oostenrijk tien keer zo hard moest werken als anderen in dezelfde positie.¹⁴⁴ Het is tekenend dat Ehrenfest desondanks een open blik trachtte te behouden jegens antisemieten. In 1928 schreef hij dat de Amerikaanse theoretisch fysicus Edwin Kemble de Joodse elementen aan de Oost-Amerikaanse hogescholen voor een zware bedreiging hield. Desondanks merkte Ehrenfest op dat hij de laatste tien jaar verschillende goede gesprekken had gehad met ras-antisemieten [*sic*], en ook aan dit gesprek hield hij alleen maar goede herinneringen over.¹⁴⁵

Ehrenfest leefde in het relatief rustige Nederland. Zijn vriend Einstein daarentegen werkte in Berlijn, en merkte nog aan den lijve dat er sterke anti-Joodse gevoelens heersten. Zijn status als beroemdheid wekte afgunst. Zijn relativiteitstheorieën werden door enkele fysici bestempeld als ‘Joods bedrog’. Daarmee werden de anti-Joodse gevoelens vermengd met gevoelens van weerstand jegens de nieuwe fysica, vooral onder oudere fysici, die Einsteins theorieën zagen als niets anders dan gegoochel met klokken en meetlatten.¹⁴⁶ Daar kwam bij dat veel oudere hoogleraren zich verzetten tegen de nadruk die de laatste 10-15 jaar was komen te liggen op de theoretische natuurkunde. Einsteins theorie werd als één van de verderfelijke uitwassen van dit fenomeen gezien. De andere was de opkomst van een eveneens zeer tegen-intuïtieve theorie, de quantummechanica. De statistische interpretatie van de Schrödingervergelijking werd voorgesteld door een Joodse fysicus, en de niet-Joodse Heisenberg – uitvinder van de onzekerheidsrelatie – viel wel

¹⁴³ Casimir, *Haphazard reality* (1983) 84.

¹⁴⁴ Medawar en Pyke, *Hitlers geschenk* (2001) 142.

¹⁴⁵ Ehrenfest aan Hugo Ehrenfest, 12 oktober 1928, APE EPC 1, sectie 6.

¹⁴⁶ In Nederland hadden onder andere J.D. van der Waals jr. en G. Heymans bezwaren tegen de relativiteitstheorie: J.D. van der Waals jr., ‘Over de ruimte’, in: *Onze Eeuw* 21 (1921) 57-84; Ibid., *Over den wereldaether* (Haarlem 1921); Ibid., *De relativiteitstheorie* (Haarlem 1923); G. Heymans, ‘Leekenvragen ten opzichte van de relativiteitstheorie’, in: *De Gids* 85 (1921) 85-108. Zie hiervoor ook: Klomp, *De relativiteitstheorie in Nederland* (1997) 43-45; 84-85.

de betiteling ‘witte Jood’ ten deel.¹⁴⁷ Kortom, de negatieve effecten van de moderne ontwikkelingen binnen de fysica werden door een aantal wetenschappers gezocht in de overheersende invloed van de theoretische fysica, met haar grote aandeel van Joodse wetenschappers. Los van de antisemitische toon had de kritiek veel gemeen met de bezwaren die Ehrenfest en anderen hadden ten opzichte van de moderne fysica. Anne Harrington argumenteert dat tijdens de Weimarperiode ‘various liberal, democratic, and Jewish scientists were attracted to both the intellectual and cultural promises of holism and managed to share concerns about the “mechanization” of both science and society with their more reactionary and in some cases, anti-Semitic colleagues.’¹⁴⁸

Een combinatie van antisemitische en antirelativistische krachten kwam tot ontlading op een bijeenkomst die Paul Weyland op 24 augustus 1920 had georganiseerd in de zaal van de Berliner Philharmoniker. In aanwezigheid van Einstein haalden Weyland en de fysicus Ernst Gehrcke de relativiteitstheorie door het slijk. Einstein werd beschuldigd van plagiaat, sensatiezucht en wetenschappelijk dadaïsme. In de zaal werden emblemen met hakenkruizen en antisemitische literatuur verkocht. Op 27 augustus reageerde Einstein met een open brief in het *Berliner Tageblatt*, waarin hij Weyland, Gehrcke en Lenard in felle bewoordingen terechtwees.¹⁴⁹ In een bijeenkomst van de Gesellschaft der deutschen Naturforscher und Ärzte in Bad Nauheim van 19-25 september 1920 namen Einstein en Philipp Lenard het tegen elkaar op. Lenard en Stark werden later in het Nazi-tijdperk de voormannen van een ‘Arische fysica’, waaruit Joodse theorieën werden geweerd. Ehrenfest liet weten dat Einstein in Leiden een voltijdbaan als gewoon hoogleraar zou kunnen krijgen, mocht hij uit Duitsland willen vertrekken. Ehrenfest liet tevens weten hoe misplaatst hij Einsteins bijtende reactie in het *Berliner Tageblatt* vond. Einstein liet zich teveel kennen door mee te gaan in de stroom van beschuldigingen.¹⁵⁰

De jaren daarop werd de situatie in Duitsland grimmiger. Toen op 24 juni 1922 Walther Rathenau – de Joodse minister van buitenlandse zaken en goede vriend van Einstein – werd vermoord, ontving ook Einstein doodsb bedreigingen. Hij vertrok voor een reis naar Japan en in

¹⁴⁷ Hentschel, *Physics and national socialism* (1996) 152-157.

¹⁴⁸ A. Harrington, *Reenchanted Science: Holism in German Culture from Wilhelm II to Hitler* (Princeton 1996) xxi.

¹⁴⁹ *EP* 7, doc. 45.

¹⁵⁰ *EP* 10, doc. 114 en 127.

november 1923, ten tijde van Hitlers en Ludendorffs mislukte putsch in München, vluchtte hij naar Leiden.¹⁵¹

De echte problemen begonnen toen op 30 januari 1933 Hitler tot kanselier werd benoemd. Na de Rijksdagbrand op 27 februari 1933 werd zonder veel problemen op 23 maart de machtigingswet aangenomen waardoor Hitler de bevoegdheid kreeg om wetten met een enkele handtekening door te voeren. Op 31 maart 1933 werden alle Joodse rechters ontslagen. Op 7 april 1933 werd de *Gesetz zur Wiederherstellung des Berufsbeamtentums* doorgevoerd. Hierdoor verviel in een klap de onafhankelijkheid van de Duitse staatsuniversiteiten. Aanstellingen en ontslagen werden nu direct geregeld door het Ministerie van Onderwijs. Als gevolg hiervan werd een groot aantal Joodse geleerden ontslagen. In totaal zou de eerste ontslaggolf van 1933/34 het ontslag van 1145 docenten aan het hoger onderwijs ten gevolge hebben.¹⁵² Die werden niet allemaal tegelijk ontslagen, maar in meerdere fasen.¹⁵³

In 1933 kreeg Ehrenfest een beeld van de Duitse antisemitische gevoelens toen hij in Berlijn sprak met onder anderen Johannes Stark, al meer dan dertig jaar een goede kennis van Ehrenfest. Ondanks grote meningsverschillen konden ze drie uur lang rustig praten, waarbij Stark Ehrenfest verzekerde dat hij op geen enkele wijze betrokken was bij het voorbereiden van het ontslag van Joodse fysici door het Hitler-regime. In één adem verklaarde hij echter dat hij al zijn invloed zou gebruiken om de ‘verderfelijke overheersing van de experimentele fysica door de theoretische’ te vernietigen.¹⁵⁴

Einstein – op bezoek in Amerika ten tijde van Hitlers machtsovername – besloot niet terug te keren naar Duitsland. Hij keerde wel terug naar Europa. Tijdens de overtocht hoorde hij dat zijn zomerverblijf in Caputh door de Nazi's was geplunderd, onder het voorwendsel dat de communisten het als bergplaats voor wapens gebruikten. Nadat het schip de haven van Antwerpen was binnengelopen begaf Einstein zich onmiddellijk naar het Duitse consulaat in Brussel, leverde daar zijn Duitse paspoort in en verklaarde dat hij het Duitse staatsburgerschap opgaf. Hij vestigde zich tijdelijk in België, en

¹⁵¹ Heilbron, *The dilemmas of an upright man* (1986) 114–122; Van Dongen, ‘Reactionaries and Einstein’s fame’ (2007) 212–230.

¹⁵² Hentschel, *Physics and national socialism* (1996) lv.

¹⁵³ Gerstengarbe, ‘Die erste Entlassungswelle von Hochschullehrern’ (1994) 17–39, m.n. 18.

¹⁵⁴ Ehrenfest aan P. Kapitza, 19 mei 1933, APE ESC 6, sectie 4.

beëindigde zijn lidmaatschap van de Preussische Akademie der Wissenschaften.¹⁵⁵ Niet lang daarna verscheen er een veroordeling door de Akademie, waarin het neerleggen van het lidmaatschap van de Akademie werd toegejuicht. Max von Laue protesteerde hiertegen, maar niemand anders dan von Laue durfde binnen de Akademie openlijk de verklaring aan te vechten.¹⁵⁶ Wel wilde Arnold Berliner, de Joodse hoofdredacteur van *Die Naturwissenschaften*, samen met andere leden van de Akademie heimelijk afstand nemen van deze verklaring en daarop schreef Berliner in april 1933 aan Ehrenfest. Hij deelde Ehrenfest mee dat het ging om een actie van maar enkele leden van de Akademie, en dat de verklaring nooit in de Akademie was besproken. Hij vroeg Ehrenfest daarom als protest een verklaring te sturen naar de redactie van *Science* en *Nature*. 'Falls Sie dem Plane beistimmen, sollen Sie dieses Notiz an *Nature* und an *Science* schicken – denn wenn ich es thue, riskire ich vielleicht doch Kopf und Kragen. Von Holland aus kann die Notiz sicherlich ohne Risiko von Stapel gelassen werden.'¹⁵⁷ Ehrenfest schreef een stuk en gaf het mee aan De Sitter, die met redactieleden van *Nature* sprak, maar het niet gepubliceerd kreeg.¹⁵⁸ Wellicht wilde de redacteur zich niet aan dit politiek getinte stuk wagen. Hoe het ook zij, enige tijd later verscheen de anonieme verklaring als onderdeel van een artikel wel op 2 juni 1933 in *Science*. Zoals nu blijkt was deze verklaring dus door Ehrenfest ingestuurd, aangehaald als: 'A correspondent writes from Holland'. Hierin werd de van Berliner verkregen informatie uit de doeken gedaan. Hieruit bleek dat de verklaring omtrent Einstein niet tijdens een officiële zitting van de Akademie was opgesteld. Ze was ondertekend door de waarnemend secretaris Heymann. De latere erkenning van de verklaring was ondertekend door Heymann en Von Ficker, één van de vaste secretarissen van de mathematisch-fysische sectie van de Akademie. Hiermee werd de andere vaste secretaris – Max Planck, in Italië ten tijde van de verklaringen – buitenspel gezet.¹⁵⁹

¹⁵⁵ Isaacson, *Einstein. His life and universe* (2007) 401-414.

¹⁵⁶ Isaacson, *Einstein. His life and universe* (2007) 405-407.

¹⁵⁷ A. Berliner aan Ehrenfest, 25 april 1933, APE ESC 1, sectie 3.

¹⁵⁸ Ehrenfest aan P. Kapitza, 30 mei 1933, APE ESC 6, sectie 4.

¹⁵⁹ Anoniem, 'Scientific Events: The Scientific Situation in Germany' (1933) 528-529; 'Verklaring aan *Nature*', APE ESC 1, sectie 3. Ernst Heymann, hoogleraar in de rechten, had de verklaring van de Akademie opgesteld op een zondag, in afwezigheid van Planck en de waarnemend secretaris Heinrich von Ficker. Zie over Einstein, de verklaringen van de Akademie en de reactie van (zoals nu

Nu de weg naar Duitse tijdschriften voor hem was afgesloten, stuurde Einstein voorlopig zijn wetenschappelijke artikelen vanuit België op naar Ehrenfest, ter plaatsing in de Verslagen van de Akademie.¹⁶⁰ De naar Engeland uitgeweken Berlijnse hoogleraar geneeskunde Johann Plesch – de arts van Einstein – wilde voor Einstein redden wat er te redden viel. Vooral wilde hij Einsteins stiefdochter Ilse Kayser en haar echtgenoot uit Duitsland halen.¹⁶¹ Dat was inmiddels al gelukt. Ilse was samen met haar man naar Nederland gevlucht.¹⁶² Het is aannemelijk dat zij hierbij hulp hebben gekregen van Ehrenfest, gezien Ilse's brief vanuit België aan Ehrenfest, waarin ze hem bedankt voor zijn hulp die hij haar in Scheveningen geboden had.¹⁶³ Na enige tijd in België te hebben doorgebracht vertrok Einstein in oktober 1933 voorgoed naar Amerika.

De eerste maanden na de eerste ontslaggolf was er vooral veel onduidelijkheid over het lot van de Joodse fysici. Begin 1933 meldden de kranten in de VS nog dat de berichten over de antisemitische acties in Duitsland sterk waren overdreven. G.B. Pegram van Columbia University schreef begin 1933 aan Ehrenfest: 'I certainly trust that even Hitler will see the necessity of stopping any persecutions.'¹⁶⁴

Ehrenfest zag het niet zo rooskleurig in. Hij vroeg aan Kapitza of Rutherford niet wilde kijken of er mogelijkheden waren om goede, jonge fysici in het Britse Gemenebest onder te brengen, bijvoorbeeld in West-Canada, Nieuw Zeeland, Zuid Afrika. Of dat Ehrenfest zelf daar terecht kon, zodat zijn positie vrij kwam voor een jongere fysicus.¹⁶⁵ Rutherford liet Ehrenfest via Kapitza weten niets voor dit plan te voelen, maar werd wel enthousiast voor een plan om binnen Engeland iets voor de ontslagen Joodse geleerden te organiseren.¹⁶⁶ Ten behoeve van de Joodse geleerden riep Rutherford in het weekend van 6-8 mei 1933 samen met anderen de *Academic Assistance Council* in het leven. Via de *Council* zouden talloze Joodse wetenschappers in het buitenland een nieuw bestaan opbouwen.

blijkt) Berliner en Ehrenfest: Hentschel, *Physics and national socialism* (1996) 18-21 en 59-61.

¹⁶⁰ Ehrenfest aan Einstein, 22 mei 1933, APE ESC 3, sectie 9.

¹⁶¹ J. Plesch aan Ehrenfest, 15 juli 1933, APE ESC 8, sectie 8.

¹⁶² Isaacson, *Einstein. His life and universe* (2007) 404.

¹⁶³ I. Kayser aan Ehrenfest, 17 april 1933, APE ESC 3, sectie 9.

¹⁶⁴ G.B. Pegram aan Ehrenfest, 25 maart 1933, APE ESC 8, sectie 7.

¹⁶⁵ Ehrenfest aan P. Kapitza, 25 april 1933, APE ESC 6, sectie 4.

¹⁶⁶ Ehrenfest aan P. Kapitza, 4 mei 1933, APE ESC 6, sectie 4.

Boven alles was er behoefte aan een duidelijk overzicht van de stand van zaken in Duitsland. Een uitnodiging van enkele Duitse fysici voor een bezoek aan Berlijn werd door Ehrenfest meteen aangegrepen om meer informatie te verkrijgen over de toestand van veel Joodse collega's. Ook vond daar het al eerder genoemde gesprek met Stark plaats. Vanwege Starks grenzeloze verering van Rutherford meende Ehrenfest dat het kon lonen om Rutherford te bewegen tot een gesprek met Stark. Stark was door het verdringen van Paschen directeur van de Deutsche Physikalische Reichsanstalt. Hij en Lenard waren nu belangrijke adviseurs van de regering.¹⁶⁷ Kennelijk hoopte Ehrenfest via Stark de toestand voor de Joodse fysici enigszins te kunnen verbeteren. Na zijn bezoek aan Duitsland van 5-8 mei 1933 schreef Ehrenfest een rondzendbrief aan Kapitza en anderen, waarin hij de situatie schetste. Grote onduidelijkheid bleef bestaan omdat, zoals al eerder opgemerkt, niet alle Joodse wetenschappers in een keer werden ontslagen. Een aantal Joodse hoogleraren kon gewoon hun eerste colleges geven, hoewel in de krant was beweerd dat ze 'beurlaubt' waren, maar daar nog geen bevestiging van hadden ontvangen. Laboratoria en bibliotheken mochten niet worden betreden, buitenlandse reizen werden soms wel, soms niet toegestaan. Vooral in de kleine universiteitssteden bleek men last te hebben van beledigingen, het afluisteren van telefoongesprekken en het openen van de post. Er waren onduidelijke dreigementen aan het adres van niet-Joodse wetenschappers die eventueel zouden willen protesteren tegen de behandeling van hun Joodse collega's. Ehrenfest stelde voor dat men om te beginnen de ontslagen fysici zou moeten uitnodigen voor conferenties, lezingen, en dergelijke. Dit in afwachting van meer permanente oplossingen van het probleem. Alle correspondentie hierover moest zeer voorzichtig geformuleerd worden en vanwege de postcensuur via collega's in Zwitserland, Nederland en Scandinavië lopen. Ehrenfest stuurde een voorlopige lijst mee van fysici van wie hij gehoord had dat die hun baan hadden verloren.¹⁶⁸ Kapitza vertaalde de brief en de door Ehrenfest verzamelde lijst van ontslagen fysici en overhandigde het schrijven aan de Britse hoogleraar wiskunde G.H. Hardy, en aan enkele Duitse professoren.¹⁶⁹ Ehrenfest ontving enkele dagen later Szilard in Leiden, die Ehrenfest op de hoogte stelde van de Engelse en Belgische

¹⁶⁷ Ehrenfest aan P. Kapitza, 19 mei 1933, APE ESC 6, sectie 4.

¹⁶⁸ P. Ehrenfest, *Eindruck über die Situation der Physiker in Deutschland 8 mai 1933*, 13 mei 1933, APE ESC 6, sectie 4.

¹⁶⁹ P. Kapitza aan Ehrenfest, 16 mei 1933, APE ESC 6, sectie 4.

hulpacties.¹⁷⁰ De Hongaars-Joodse Szilard was vanaf 1925 assistent bij Von Laue in Berlijn. Nu was hij medewerker van de door onder anderen Rutherford opgerichte *Academic Assistance Council*.¹⁷¹ Szilard coördineerde de acties, vanuit twee kamertjes op de zolder van de Royal Society. Hij reisde heen en weer tussen het vasteland om het AAC aan lijsten met contactpersonen te helpen. De AAC wist binnen drie jaar ongeveer dertienhonderd gevluchte wetenschappers te helpen en bemiddelde bij het vinden van vast werk voor talloze anderen.

Ehrenfest bracht Szilard in Nederland in contact met enkele geleerden – onder wie de Utrechtse chemici Cohen en Kruyt –, in de hoop dat het Engelse voorbeeld hier tot enige navolging zou leiden.¹⁷² Ehrenfest stuurde de lijst door naar Burgers, die hem doorstuurde naar onder andere het *Comité van Nederlandsche Hoogleeraren ten behoeve van Joodsche studeerenden en afgestudeerden uit Duitsland*, te Amsterdam.¹⁷³ Ehrenfest stelde voor op dit moment de allerbeste fysici voorrang te verlenen, omdat er zoveel ontslagen Joodse fysici waren dat het hem duizelde.¹⁷⁴ Ook stuurde hij namenlijsten naar Schwartz in Zürich, de voorzitter van de *Notgemeinschaft*, het Zwitserse hulpcomité.¹⁷⁵ Inmiddels meldde Born dat ingrijpen van de Rockefeller Foundation gewenst was omdat in Göttingen bijna de gehele natuurwetenschappelijke staf op straat werd gezet. Ehrenfest had hierover al aan Tisdale geschreven.¹⁷⁶ Tisdale ondernam actie. Na een reis naar Rusland schreef hij dat Frenkel daar geïnteresseerd was in Heitler, London en Bethe.¹⁷⁷

Hiermee werd een begin gemaakt met het op touw zetten van reddingsacties voor de ontslagen fysici. Het was duidelijk dat alle correspondentie hierover via de ‘neutrale’ landen moest lopen. Ehrenfest

¹⁷⁰ Ehrenfest aan P. Zeeman en A.D. Fokker, 19 mei 1933, APE ESC 4, sectie 6.

¹⁷¹ Medawar en Pyke, *Hitlers geschenk* (2001) 59.

¹⁷² Ehrenfest aan P. Kapitza, 19 mei 1933, APE ESC 6, sectie 4; Ehrenfest aan L.S. Ornstein en H.A. Kramers, 21 mei 1933, APE ESC 8, sectie 5.

¹⁷³ J. Burgers aan Ehrenfest, 15 mei 1933, APE ESC 2, sectie 7.

¹⁷⁴ Ehrenfest aan H. Frijda, 27 april 1933, APE ESC 8, sectie 3.

¹⁷⁵ M. Born aan Ehrenfest, 20 juli 1933, APE ESC 2, sectie 5. Schwartz ging later naar Istanbul en hielp daar honderden medici aan een baan. Demuth volgde hem op en verplaatste het kantoor naar London. Daar ging deze samen met de AAC en vormde de SPSL, de *Society for the Protection of Science and Learning*. Zie: Medawar en Pyke, *Hitlers geschenk* (2001) 73, en: Zimmerman, ‘The Society for the Protection of Science and Learning and the politicization of British Science in the 1930s’ (2006) 25-45.

¹⁷⁶ M. Born aan Ehrenfest, 19 mei 1933, APE ESC 2, sectie 5.

¹⁷⁷ M. Born aan Ehrenfest, 11 juni 1933, APE ESC 2, sectie 5.

fungeerde in Nederland als spil van de correspondentie tussen Duitse, Engelse en Amerikaanse fysici. Hij kwam er al spoedig achter dat structurele oplossingen maar moeilijk te realiseren waren. Alleen provisorische oplossingen voor de jongere geleerden waren mogelijk. Joffe was de enige die iedereen wel wilde hebben en hij kwam met een plan om de Joodse fysici over Russische instituten te verdelen.¹⁷⁸

Ehrenfest pleitte voor centralisatie van alle hulpverzoeken in Europa. Voor de theoretisch fysici wilde hij een Europees centrum in Nederland instellen.¹⁷⁹ Na het bezoek van Szilard nam Ehrenfest contact op met Rosenfeld in België en pleitte voor het oprichten van zo'n centrum in Nederland. Volgens hem was dat belangrijk, want hijzelf had uitmuntende contacten met Rusland, Einstein en Bohr, en met veel mensen in Duitsland. Ehrenfest stelde voor dat het centrum wellicht 'in Haarlem' kon komen.¹⁸⁰ Dat was een hint richting de bij de Haarlemse Teylers Stichting aangestelde Fokker, die de brief bij rondzending onder ogen kreeg. Fokker zag het niet zitten deze taak op zich te nemen en probeerde er tactisch op te wijzen dat juist Ehrenfest door zijn relaties een verbindingsschakel kon zijn.¹⁸¹

Hulp aan Joodse geleerden stond niet alleen in het teken van het redden van enkele van de beste wetenschappers. Veelal werd de hulp gerechtvaardigd door te wijzen op het profijt dat kon worden getrokken van de talenten van de voornaamste geleerden, een bijkomend voordeel waar bij de oprichting van het Groningse Comité tot Steun aan Joodsche geleerden uit Duitschland bijvoorbeeld nadrukkelijk op werd gewezen.¹⁸² Iemand die de hulp zeker voordeel opleverde was Frederick Lindemann – een Brit met een Duitse vader die in Breslau had gestudeerd bij Walther Nernst en in 1919 hoogleraar natuurkunde te Oxford was geworden. Lindemann zag kans het verouderde Clarendon Laboratory te Oxford in 1933 met behulp van zijn goede connecties met het ICI en met het aanstellen van de uit Breslau afkomstige Joodse Franz Simon, Nicholas Kurti, Heinz en Fritz London, en Kurt Mendelssohn, om te bouwen tot een internationaal hoog aangeschreven laboratorium.¹⁸³ Met zijn connecties was hij net als Ehrenfest een spin in het internationale web

¹⁷⁸ Ehrenfest aan Max en Hedi Born, 14 juni 1933, APE ESC 2, sectie 5.

¹⁷⁹ Ehrenfest aan P. Kapitza, 30 mei 1933, APE ESC 6, sectie 4.

¹⁸⁰ Ehrenfest aan L. Rosenfeld, 21 mei 1933, APE ESC 9, sectie 1.

¹⁸¹ A.D. Fokker aan Ehrenfest, 23 mei 1933, APE ESC 4, sectie 6.

¹⁸² Van Berkel, *Academische illusies* (2005) 91.

¹⁸³ Medawar en Pyke, *Hitlers geschenk* (2001) 66-67.

voor het herplaatsen van ontslagen Joodse wetenschappers. Ehrenfest stuurde Lindemanns brieven rond, onder anderen aan Franck. Omdat Ehrenfest de theoretisch fysici kende,¹⁸⁴ antwoordde Franck weer via Ehrenfest welke wetenschappers al wel, en welke nog niet geholpen werden. Door deze bemiddeling wist Lindemann beurzen in Engeland te krijgen voor London, Teller en H. Kuhn. Om de mogelijkheden voor een baan in het buitenland verder te onderzoeken werd Fritz London door Ehrenfest uitgenodigd om naar Leiden te komen in mei.¹⁸⁵ London en Kuhn zouden later op het Clarendon terechtkomen, Teller in de Verenigde Staten. Franck meldde via Ehrenfest aan Lindemann dat Heitler een baan had in Bristol, en dat Nordheims mogelijke lectoraat bij Fowler in Cambridge naar een Engelsman ging, zodat er alternatieven moesten worden gezocht.

Ook een stortvloed van niet-fysici wendde zich tot Ehrenfest voor hulp.¹⁸⁶ Ehrenfest stuurde hulpverzoeken van andere wetenschappers dan de theoretisch natuurkundigen door naar collega's, met het verzoek deze van nadere informatie te voorzien en door te sturen naar het *Comité van Nederlandsche Hoogleraren ten behoeve van Joodsch studeerenden en afgestudeerden uit Duitsland*, geleid door de hoogleraren P. van der Wielen en H. Frijda.¹⁸⁷ Universiteiten uit diverse landen boden aan de ontslagen natuurwetenschappers op te nemen. Ehrenfest meldde op verzoek van secretaris H. Frijda de namen van belangrijke experimentele en theoretische fysici ter plaatsing aan de universiteit van Istanbul, die bij Frijda naar een fysicus had geïnformeerd. Atatürk wilde het hoger onderwijs hervormen als belangrijk onderdeel van zijn inspanningen om de nieuwe Turkse staat in een modern land te veranderen. Hij zag de ontslagen wetenschappers dan ook graag naar Turkije komen. Ehrenfest beval de experimentatoren James Franck, Otto Stern, Peter Pringsheim, en de theoretici Max Born, Fritz London en Walter Heitler aan.¹⁸⁸ Franck en Born zouden in 1933 Turkije bezoeken als wetenschappelijke adviseurs.¹⁸⁹ Turkije werd een belangrijk toevluchtsoord voor zo'n tweehonderd verdreven wetenschappers, onder

¹⁸⁴ J. Franck aan Ehrenfest, 26 juli 1933, APE ESC 4, sectie 6.

¹⁸⁵ Gavroglu, *Fritz London* (1995) 105.

¹⁸⁶ Ehrenfest aan A.D. Fokker, 14 mei 1933, APE ESC 4, sectie 6.

¹⁸⁷ Ehrenfest aan H.R. Kruyt, 21 mei 1933, APE ESC 6, sectie 10; Ehrenfest aan H. Frijda, 20 juni 1933, APE ESC 8, sectie 3.

¹⁸⁸ Ehrenfest aan H. Frijda, 30 mei 1933, APE ESC 8, sectie 3.

¹⁸⁹ Reisman, *Turkey's Modernization* (2006) 22-23, 137.

wie de fysici Dember, Fouché, Mendelssohn, Von Hippel, de wiskundigen Von Mises en Prager, en de astronomen Freundlich, Gleisberg, Rosenberg en Royds.¹⁹⁰ Het hoger onderwijs ondervond er door hun invloed een ware transformatie.

Ehrenfest stond ook in contact met Stephen Duggan van het Institute of International Education te New York. Deze onafhankelijke non-profit organisatie was in 1919 door internationalisten opgericht om academische reizen mogelijk te maken om de onderlinge verstandhoudingen te versterken.¹⁹¹ De instelling zamelde nu privé-geld in om gevestigde hoogleraren stipendia te kunnen aanbieden, zodat ze een aantal jaren voor een bescheiden salaris aan Amerikaanse universiteiten konden werken.¹⁹²

In Cambridge had Sidney Goldstein van Ch. Weizmann, voorzitter van de raad van bestuur van de Universiteit van Jeruzalem, opdracht gekregen om Franck te polsen voor een positie in Jeruzalem en het plaatsen van zoveel mogelijk Joodse assistenten. Goldstein trachtte Franck via Ehrenfest te benaderen.¹⁹³ Ehrenfest kende Goldstein echter niet en moest omwille van Franck voorzichtig te werk gaan, en antwoordde daarom via Kapitza aan Goldstein. Goldstein moest geduld hebben, omdat Franck door Ehrenfest bij een passende gelegenheid moest worden benaderd. Franck was van 18-25 juni uitgenodigd voor een lezingenserie te Leiden. Ehrenfest opperde dat Weizmann zelf naar Leiden kon komen om met Franck te praten.¹⁹⁴ In juni 1933 kwam Franck naar een vergadering van de KAW in het Trippenhuis, alwaar hij met Frijda sprak.¹⁹⁵ Ehrenfest nam ook contact op met Fränkel aan de Universiteit van Jeruzalem.¹⁹⁶

Intussen ontving Ehrenfest steeds langere lijsten ontslagen fysici en chemici.¹⁹⁷ In veel gevallen kon hij alleen maar als doorgeefluik fungeren voor correspondentie tussen Duitse, Engelse en Amerikaanse geleerden. Her en der probeerde hij directe hulp te bieden, wat vrij moeilijk was. Ehrenfest was in het bijzonder bezorgd om Born. Hij

¹⁹⁰ Reisman, *Turkey's Modernization* (2006)

¹⁹¹ Halpern, *The Institute of International Education* (1969); Taylor, *Investing in People Linking Nations* (1994).

¹⁹² Ehrenfest aan H. Frijda, 19 juni 1933, APE ESC 8, sectie 3.

¹⁹³ S. Goldstein aan Ehrenfest, 20 mei 1933, APE ESC 4, sectie 10.

¹⁹⁴ Ehrenfest aan P. Kapitza, 30 mei 1933, APE ESC 6, sectie 4.

¹⁹⁵ Ehrenfest aan H. Frijda, 20 juni 1933, APE ESC 8, sectie 3.

¹⁹⁶ Ehrenfest aan H. Frijda, 19 juni 1933, APE ESC 8, sectie 3.

¹⁹⁷ Ehrenfest aan P. Kapitza, 19 mei 1933, APE ESC 6, sectie 4.

probeerde Born bij Fermi in Italië te stationeren, maar in Italië konden alleen Italiaanse staatsburgers een aanstelling krijgen.¹⁹⁸ Ten tijde van de ontslaggolf van Joodse wetenschappers overwoog Casimir serieus om bij Heisenberg te gaan werken, net nu Born daar weggestuurd was. Dit maakte Ehrenfest woedend.¹⁹⁹ Tot Ehrenfests tevredenheid sloeg Kramers een aanbod om Born in Göttingen op te volgen, af.²⁰⁰ Het verontrustte Ehrenfest dat Heisenberg tegenover Born zelf volhield dat de huidige situatie een excès was. Heisenberg had Born medegedeeld dat Born ondanks zijn ontslag welkom zou blijven op Heisenbergs instituut. Born moest geduldig afwachten op het moment waarop vanzelf een nieuwe politieke situatie zou ontstaan waarin 'het hatelijke van het mooie' zal worden gescheiden, aldus Heisenberg.²⁰¹

Ehrenfest wilde Born graag helpen en zag tegelijkertijd mogelijkheden om van Borns verblijf in Leiden te profiteren. Hij stelde aan Born voor om naar Nederland te komen en gezamenlijk de schouders onder de kwijnende Leidse theoretische fysica te zetten. Born wees dat af, omdat er een formele aanstelling nodig was, met wat voor bescheiden salaris dan ook; anders zou hij in Nederland als vluchteling worden beschouwd, met alle economische en juridische gevolgen van dien.²⁰² De Gentse hoogleraar J.E. Verschaffelt liet Ehrenfest weten Born wel als theoretisch fysicus te willen aanstellen.²⁰³

Ehrenfest wilde Born uitnodigen voor een collegeserie in Leiden. Het achterliggende idee was dat hierdoor een hele reeks uitnodigingen voor Born kon worden aangezwengeld, zeker vanuit België en Engeland. Daar kon Born dan ook onderhandelen met anderen over een eventuele aanstelling elders.²⁰⁴ Ogenschijnlijk had deze aanpak succes, want niet veel later zou Born hoogleraar te Cambridge worden. Met als doel het bieden van een platform voor het in de wacht slepen van nieuwe aanstellingen begon Ehrenfest ook andere ontslagen Joodse fysici met behulp van het Lorentzfonds voor korte tijd uit te nodigen voor colloquia in Leiden.

¹⁹⁸ Ehrenfest aan E. Fermi, 17 mei 1933; E. Fermi aan Ehrenfest, 7 juni 1933, APE ESC 4, sectie 2.

¹⁹⁹ H.B.G. Casimir aan Ehrenfest, 18 mei 1933, APE ESC 2, sectie 9; Ehrenfest uitte zijn woede in de kantlijn van deze door Casimir gestuurde brief.

²⁰⁰ Ehrenfest aan H.A. Kramers, 4 september 1933, APE ESC 6, sectie 9.

²⁰¹ M. Born aan Ehrenfest, 11 juni 1933, APE ESC 2, sectie 5.

²⁰² Ehrenfest aan O. Oldenburg, 3 mei 1933, APE ESC 8, sectie 2.

²⁰³ J.E. Verschaffelt aan Ehrenfest, 14 juli 1933, APE ESC 10, sectie 6.

²⁰⁴ Ehrenfest aan P. Zeeman en A.D. Fokker, 19 mei 1933, APE ESC 4, sectie 6.

De financiële situatie van de Leidse universiteit was op dat moment slecht. Begin jaren dertig werden drastische bezuinigingen doorgevoerd aan de universiteit. Abonnementen op sommige tijdschriften werden opgezegd en de aanschaf van boeken werd sterk beperkt. Het was niet meer mogelijk om alle boeken zowel voor de bibliotheek als de leeskamers aan te schaffen. Met het materieel krediet van theoretische fysica kon deze terugval niet worden ondervangen; dat bedroeg jaarlijks slechts 1.250 gulden en kon niet verhoogd worden.²⁰⁵

Ook het Lorentzfonds had onder de crisis te lijden. In het begin werd er met de middelen van het fonds terughoudend omgesprongen. Geld werd slechts voor de allerdringendste gevallen aangewend. Ehrenfest en Fokker hielden er rekening mee dat de volle omvang van de crisis pas in de nazomer van 1933 duidelijk zou worden.²⁰⁶ Fokker had er op gewezen dat er voorzichtig moest worden omgesprongen met het geld. Er was met geld uit het fonds een hypotheek uitgezet, en de rente kon door de hypotheeknemer moeilijk worden betaald. Ook moest men met het ergste rekening houden, zoals mogelijke hongersnood onder theoretisch fysici. Ehrenfest stemde in met Fokkers voorzichtigheid.²⁰⁷ Vanwege het beperkte budget wilde Ehrenfest de allerbeste fysici voortrekken. Om deze reden kreeg Glogowski, slechts een techniekleraar in Bad Frankenhausen, na een vraag om bemiddeling van Ehrenfest nul op het rekest – al hield Ehrenfest vol dat de reden voor afwijzing was dat nog steeds eerst een vollediger beeld van de situatie in Duitsland moest worden verkregen, en de hulpacties gecoördineerd moesten worden.²⁰⁸ De talentvolle theoretisch fysicus Felix Bloch werd afgewezen, omdat hij zich in Zwitserland bevond en bovendien over niet al te lange tijd een Rockefeller-beurs zou ontvangen.²⁰⁹ Door korte uitnodigingen naar Leiden hoopte Ehrenfest de Joodse fysici een morele oppepper te kunnen geven.²¹⁰ Karl Weissenberg, een 34-jarige ontslagen Oostenrijkse

²⁰⁵ Curatoren aan Ehrenfest, 21 juni 1933; 27 juni 1933, APE ESC 8, sectie 5.

²⁰⁶ Bloch aan Ehrenfest, 29 april 1933; Ehrenfest aan Bloch, 15 mei 1933, APE ESC 1, sectie 4.

²⁰⁷ A.D. Fokker aan Ehrenfest, 14 mei 1933, APE ESC 4, sectie 6.

²⁰⁸ Glogowski aan Ehrenfest, 5 mei 1933; Ehrenfest aan Glogowski, 12 mei 1933, APE ESC 4, sectie 7.

²⁰⁹ Bloch aan Ehrenfest, 29 april 1933; Ehrenfest aan Bloch, 15 mei 1933, APE ESC 1, sectie 4; A.D. Fokker aan Ehrenfest, 14 mei 1933, APE ESC 4, sectie 6.

²¹⁰ Ehrenfest aan L.E.J. Brouwer, 14 mei 1933, APE ESC 2, sectie 6.

hoogleraar, werd met geld van het Lorentzfonds door Ehrenfest uitgenodigd voor het colloquium van 24 mei.²¹¹

Ehrenfest stelde voor om hierna London, Bethe, Gordon, Weisskopf, Teller en Nordheim uit te nodigen. Deze laatste had volgens Born grote kans op spoedig vertrek naar Engeland.²¹² Met een kort verblijf kon men een groter aantal fysici helpen. Ook stelde dit hen in staat om vanuit Nederland met andere landen te communiceren, iets wat vanuit Duitsland onmogelijk was. Wel moest worden duidelijk gemaakt dat in Nederland het vinden van zelfs een zeer bescheiden betaalde positie absoluut uitgesloten was. Nederland kon slechts als doorgangsstation fungeren.²¹³ De Haas vroeg aan Ehrenfest of ze Franck uit Göttingen niet konden helpen door hem in Leiden bijzonder hoogleraar te maken en of Ehrenfest daar de nodige stappen voor kon nemen.²¹⁴ Maar het is zeer waarschijnlijk dat hiervoor gewoon geen geld beschikbaar was binnen het Universiteitsfonds. Van overheidswege was helemaal geen geld te verwachten voor een dergelijke extra aanstelling. Kapitza wees erop dat in Dresden Dember was ontslagen, die zich bezighield met fotocellen. Kapitza vroeg Ehrenfest na te gaan of hij te plaatsen was bij het Philips NatLab.²¹⁵ Dember vertrok uiteindelijk naar Turkije, maar later lukte het de fysicus G.W. Rathenau om in 1934 bij Coster (secretaris van het Groningse hulpcomité) in Groningen aangesteld te worden. Hij bleef zijn hele verdere leven in Nederland, en werd later directeur van het NatLab.²¹⁶ In mei 1933 was Wolfsohn aangesteld bij Ornstein in Utrecht. Er waren dus wel mogelijkheden, maar die bleven beperkt. Ook Ornstein en Coster hebben niet veel fysici kunnen aanstellen.

Als er een ding duidelijk werd, dan was het dat een groot aantal Joodse fysici geen bron van inkomsten meer had. Op 23 mei stelde de eerst zo voorzichtige Fokker voor een circulaire te schrijven met daarop de namen van al die fysici, zodat Kramers, Coster, Zernike, Zeeman en Van der Waals jr konden aangeven welke fysici ze gedurende een week

²¹¹ H. Weissenberg aan Ehrenfest, 24 april 1933; K. Weissenberg aan Ehrenfest, 17 mei 1933, APE ESC 10, sectie 7.

²¹² Ehrenfest aan P. Zeeman en A.D. Fokker, 19 mei 1933, APE ESC 4, sectie 6; Ehrenfest aan A.D. Fokker, 14 mei 1933, APE ESC 4, sectie 6.

²¹³ Ehrenfest aan A.D. Fokker, 14 mei 1933, APE ESC 4, sectie 6.

²¹⁴ W.J. de Haas aan Ehrenfest, 25 [mei?] 1933, APE ESC 5, sectie 3.

²¹⁵ P. Kapitza aan Ehrenfest, 2 juni 1933, APE ESC 6, sectie 4.

²¹⁶ Van Delft, 'Rathenau, Gerhart Wolfgang'; Van Berkel, *Academische illusies* (2005) 91-92.

bij zich wilde hebben. Het Lorentzfonds kon de theoretisch fysici 60 gulden in de week bieden, gedurende 30 weken.²¹⁷ Dat betekende dat het gehele beschikbare budget van het Lorentzfonds werd aangewend voor hulp aan de Joodse fysici.

Later, in 1953, zou London spreken over de grote invloed die Ehrenfest had op de ontslagen Joodse fysici. Bij zijn reis naar Berlijn had Ehrenfest ze op het hart gedrukt dat er in het buitenland vrienden waren die solidair waren met het lot van de Joodse fysici. Londons bezoek aan Leiden maakte het hem mogelijk beslissingen over zijn toekomst te nemen. Na het bezoek voelde hij zich herboren.²¹⁸

Ondertussen raakte Ehrenfest steeds depressiever door de eindeloze stroom hulpverzoeken die hem dagelijks bereikte. Hij schreef aan zijn vriend Berliner dat als teken van protest een aantal oudere Joden in gebieden die weinig te kampen hadden met antisemitisme vrijwillig en geheel zonder haat afscheid zouden moeten nemen van het aardse bestaan.²¹⁹ Aan anderen schreef hij dat deze beproeving hoe dan ook tot een wedergeboorte van de Joodse jeugd zou leiden, als de jeugd maar van de last van de ouderen werd verlost.²²⁰ Ook aan Goudsmit had Ehrenfest iets dergelijks geschreven, waar Goudsmit heftig tegenin ging. Dode Joden dienden alleen maar tot vreugde van de Duitsers.²²¹ Een geschokte Berliner antwoordde dat juist nu mensen van Ehrenfests kaliber nodig waren om het tij te keren.²²²

Het ontslag van de eerste Joodse wetenschappers wekte bij Goudsmit een grote weerzin op. Hij schreef dat hij Duitsland en haar cultuur haatte. De verdrijving van de Joden zou de ondergang van de Duitse wetenschap en cultuur tot gevolg hebben.²²³ Ehrenfest begreep Goudsmits gevoelens, maar waarschuwde toch tegen dit soort 'uferlos-allgemeine Urteile'. Ehrenfest zei op teveel plaatsen geleefd en gewerkt te hebben om zulke algemene uitspraken over volken of rassen te kunnen onderschrijven. In een tijd van volledige verwarring was het volgens Ehrenfest noodzakelijk om intens aan de fijnste mensen van de verschillende vijandelijke groepen te denken en door haatvrije

²¹⁷ A.D. Fokker aan Ehrenfest, 23 mei 1933, APE ESC 4, sectie 6.

²¹⁸ Gavroglu, *Fritz London* (1995) 250-251.

²¹⁹ Ehrenfest aan A. Berliner, 13 april 1933, APE ESC 1, sectie 3.

²²⁰ Ehrenfest aan O. Oldenburg, 3 mei 1933, APE ESC 8, sectie 2.

²²¹ S. Goudsmit aan Ehrenfest, 1 mei 1933, APE ESC 5, sectie 1.

²²² A. Berliner aan Ehrenfest, 22 april 1933, APE ESC 1, sectie 3.

²²³ S. Goudsmit aan Ehrenfest, 1 mei 1933, APE ESC 5, sectie 1.

bemiddeling zoveel mogelijk proberen te redden. Beide partijen zorgden immers al voor genoeg haat. Ehrenfest bracht Goudsmit nog eens in herinnering dat hij in mei door zijn niet-Joodse Duitse collega's met alle warmte was ontvangen. Ondanks zijn Joodse uiterlijk was hij in Duitsland nergens lastiggevallen. Uitgerekend toen hij in Leiden uit de trein stapte werd Ehrenfest door twee jonge ambtenaren een beledigende opmerking naar het hoofd geslingerd.²²⁴

Conclusie

Zoals in het voorgaande duidelijk naar voren komt, was Ehrenfest iemand die buitengewoon sterk internationaal gericht was. In zijn wetenschappelijk werk richtte hij zich op het verder helpen van collega's. Anders dan andere fysici in Nederland maakte hij geen onderscheid in nationale onderzoeksstijlen. Wetenschap was voor hem een internationale bezigheid. Het ging om de vermeerdering van de wetenschappelijke kennis ten behoeve van de gehele mensheid, niet slechts ter meerdere eer en glorie van het vaderland – iets dat blijkt wanneer we zijn inzet voor het behoud en herstel van de internationale contacten in de Eerste Wereldoorlog en zijn hulp aan ontslagen Joodse fysici in 1933 bezien.

Die opvatting is begrijpelijk, wanneer we Ehrenfests achtergrond in ogenschouw nemen. Hij was zelf een buitenlander die naar Nederland was gekomen, maar Ehrenfest zag zich in het geheel niet als Oostenrijker. Hij omschreef zichzelf als iemand met een gevoel van 'Heimatslosigkeit'. Bij hem overheerste het gevoel nergens thuis te horen, een zekere ontworteldheid en een drang dit tegen te gaan. Zijn gezochte remedie was een hang naar contact met anderen, ongeacht nationaliteit. Daarbij speelde ook mee dat hij vanwege zijn onzekerheid voortdurend naar bevestiging zocht.²²⁵

Maar zeker ook vormden Ehrenfests ervaringen uit zijn voor-Leidse periode een belangrijke inspiratiebron voor zijn internationalisme. In de Duitstalige landen had hij geen kans op een aanstelling vanwege zijn halsstarrig vasthouden aan zijn onkerkelijkheid. Toen hij met zijn vrouw in 1907 naar Rusland vertrok, verging het hem daar niet beter.

²²⁴ Ehrenfest aan S. Goudsmit en G. Dieke, 14 mei 1933, APE ESC 5, sectie 1.

²²⁵ Klein, *Paul Ehrenfest* (1970) 84, 92-93, 188-189.

Bovendien lag Rusland achter op wetenschappelijk gebied en waren de Russische fysici verstoken van contacten met onder andere het toonaangevende Duitsland. Ehrenfest had tijdens zijn studietijd ervaren hoe stimulerend internationale wetenschappelijke contacten konden werken. In overeenstemming met de gewoonte in de Duitstalige gebieden had hij verscheidene universiteiten bezocht. Vooral de internationale sfeer in Göttingen sprak hem zeer aan. Dat was een plaats waar studenten en geleerden uit heel Europa naartoe togen. De leerstoel te Leiden was voor Ehrenfests als een godsgeschenk – deze verlostte hem uit zijn isolement. Vanaf het begin zette hij zich in om jonge Russische fysici dezelfde problemen als hij zelf had gehad te besparen. In Rusland introduceerde hij de moderne theoretische fysica en hielp hij mee met de opbouw van de wetenschappelijke en technische instituten in Sowjet-Rusland. Hij zorgde er persoonlijk voor dat een vors aantal jonge Russische fysici voor verdere vorming naar West-Europa of de VS konden komen. Toen hij tijdens een reis naar de Verenigde Staten merkte dat de theoretische fysica daar net als die in Rusland achterliep in vergelijking met West-Europa, besloot hij zich ook te richten op het helpen van Amerikaanse fysici. Ook uit de VS haalde hij veel jonge fysici naar Europa voor hun verdere studie. Dit gaf Ehrenfest veel voldoening; toen hij de nieuwste ontwikkelingen in de fysica niet meer kon volgen had hij toch het gevoel dat hij zich nog nuttig kon maken in de achterstandslanden door middel van een soort wetenschappelijk ontwikkelingswerk.

Veel Joodse wetenschappers werden door Ehrenfests contacten verder geholpen en kwamen in het buitenland aan een baan. Door Ehrenfest gearrangeerde bezoeken aan Nederland stelde een aantal wetenschappers in staat op neutrale bodem vaart te zetten achter hun zoektocht naar werk in het buitenland.

Ehrenfests internationalisme had ook een meer politieke en ideologische achtergrond. Hij voelde zich sterk aangetrokken tot de internationalistische en technocratische idealen zoals die tot uitdrukking kwamen in de romans van H.G. Wells (zie hoofdstuk 6). Wells verwierp als een van de weinige critici van de moderne maatschappij het concept van de natiestaat, en riep op tot een wereldregering. De wortels van Wells' gedachtegoed lagen in de Fabian Society, die een niet-revolutionaire vorm van socialisme propageerde. Bij voorkeur moest een wetenschappelijke benadering van sociale hervormingen worden gekozen. Kort nadat Wells in 1903 lid was geworden, probeerde hij de

Fabian Society in te zetten om aan scholen en universiteiten een nieuwe elite te vormen die de basis zou moeten vormen voor de latere wereldstaat. Daar voelden de overige leden van de Fabian Society niets voor, en al enkele jaren later verliet hij teleurgesteld de vereniging. Wells was expliciet socialistisch georiënteerd, maar hij was net zo min een echte socialist als hij een communist was. Socialisme en communisme hadden in zijn ogen beide hun mankementen, net als autocratie en democratie dat overigens hadden. Aan de basis van de geünificeerde wereldstaat diende de wetenschap te liggen. Wetenschap, aldus Wells, was zelf al geünificeerd; er was nooit meer dan één wetenschappelijke waarheid. Het wetenschappelijke proces zelf was autocratisch noch democratisch.²²⁶

De overeenkomsten tussen de ideologie van Wells en Ehrenfest zijn groot. Ehrenfest had geen enkele binding met welk land dan ook. Net als Wells was hij links georiënteerd, maar noch socialist, noch communist, hoewel veel van zijn studenten dat wel waren. Zoals we hierboven en in hoofdstuk 6 zagen, weigerde hij ook zwart-wit te denken. Elke ideologie had zijn gebreken. Enthousiaster was hij over de inzet van wetenschap ten behoeve van de industrie, zoals hij dat in Amerika en Rusland zag. Beter was het om wetenschappers en ingenieurs een grote rol toe te kennen binnen het politiek bestel.

Bij Ehrenfest gingen ideaal en pragmatiek hand in hand, zoals wel vaker het geval is. Niet alleen de buitenlandse fysici of de maatschappij profiteerden van Ehrenfests inzet. Ook de Leidse fysica deed zijn voordeel met Ehrenfests internationale contacten. Hoe dat gebeurde, en welk effect Ehrenfests internationale streven op de Leidse en Nederlandse fysica sorteerde, wordt in het volgende hoofdstuk nader bekeken.

²²⁶ De Wilde en Somsen, 'Government as scientific process in H.G. Wells' world state' (in voorbereiding).

Hoofdstuk 8

Bloei en verval van de Leidse theoretische fysica

Wat me wel eens wat bezwaart, is, dat het in Leiden wel erg leeg wordt als ik weg ga. 't Ware mij liever als ik U omringd wist door een leergierige schaar springlevende theoreticusjes [sic]. Maar die kan ik niet zo maar uit de grond stampen.

Casimir aan Ehrenfest¹

Wat voor invloed had Ehrenfests verregaande internationaliseringsdrang op de Leidse fysica? Zoals in het vorige hoofdstuk is uiteengezet, was de zeer internationale blik van Ehrenfest nogal uitzonderlijk in Nederland. Dat uitte zich in een aantal even uitzonderlijke stappen om de Leidse fysica internationaal tot grote hoogten te brengen. Zo zond hij zijn leerlingen voor verdere vorming naar het buitenland; iets wat in Nederland geen gebruik was onder theoretisch fysici. Ook deed hij alles wat in zijn macht lag om zijn leerlingen juist in het buitenland een baan te bezorgen – eveneens een zeldzaamheid onder natuurkundigen. Jonge buitenlandse fysici werden door hem gestimuleerd om voor korte of langere tijd naar Leiden te komen. Door Ehrenfests internationale aspiraties groeide zijn theoretisch instituut uit tot een centrum van wereldformaat. Ehrenfest had, zoals al eerder besproken, persoonlijke redenen voor zijn internationale ijver. Het zal blijken dat persoonlijke redenen tevens de oorzaak waren van een teruggang in de internationale contacten binnen het Theoretisch Fysisch Instituut midden jaren twintig – en van het verval van de Leidse theoretische fysica.²

¹ H.B.G. Casimir aan Ehrenfest, 24 juni 1932, APE EPC 2, sectie 9.

² Delen van dit hoofdstuk verschenen eerder in: M.J. Hollestelle, 'Paul Ehrenfests internationalisme. Bloei en verval van de Leidse theoretische fysica' (2009).

Bloei van het Theoretisch Fysisch Instituut

Met Lorentz had Leiden al één van 's werelds meest gerenommeerde fysici in huis. Maar pas in de jaren twintig begon de Leidse theoretische fysica onder invloed van de bezielende Ehrenfest tot volle bloei te komen.

Vanzelfsprekend had Lorentz belangwekkende ontdekkingen gedaan. Hoewel Ehrenfest minder productief was dan Lorentz, droeg hij in niet onbelangrijke mate bij aan de ontwikkeling en het begrip van de quantummechanica. Belangrijker is echter de constatering dat het succes van zijn studenten vele malen groter was dan het succes van Lorentz' leerlingen. Ehrenfests promovendi Kramers, Coster, Burgers, Dieke en Casimir leverden belangrijke bijdragen aan de matrixmechanica, Bohrs atoommodel, de adiabatische hypothese, de atoomstructuur, en wiskundige technieken in de quantummechanica. Uhlenbeck en Goudsmit ontdekten de elektronspin (zie hoofdstuk 2). De kwaliteiten van Ehrenfests studenten werden internationaal hoog aangeslagen, en die waardering gold evenzeer voor Ehrenfests kwaliteiten als opleider van jonge fysici. Maar ook gevestigde fysici pikten graag een graantje mee van Ehrenfests vermogen om ingewikkelde fysica aanschouwelijk voor te stellen. Zo verzorgde Ehrenfest een jaarlijkse lezingenreeks in Göttingen, waar hij Born en consorten op verdienstelijke wijze de nieuwe Bose-Einstein-statistiek uitlegde (zie hoofdstuk 3).

De theoretisch-fysische afdeling veranderde van een stil achterkamertje in een bruisend Instituut. Letterlijk voltrok zich dit eind 1920, toen het Instituut aanzienlijk uitbreidde en er een gebouw bijkwam.³ Dat was nodig, want Leiden trok veel talent aan. Niet alleen kon Ehrenfest rekenen op een behoorlijk aantal getalenteerde studenten. Onder de indruk van de Leidse reputatie trokken veel jonge, buitenlandse fysici voor kortere of langere tijd naar Leiden. Ehrenfest verstreekte persoonlijk veel uitnodigingen en zorgde er voor dat veelbelovende jonge fysici een bezoek aan Leiden brachten.

Het Leidse colloquium vormde een trekpleister voor veel onderzoekers. De zo kenmerkende Leidse discussiestijl speelde een belangrijke rol binnen de nieuwe ontwikkelingen. Vooral midden jaren twintig konden fysici de ontwikkelingen onmogelijk bijhouden door

³ Crommelin, 'Verbouwing en Uitbreiding' (Leiden 1922) 69-77; Van Lunteren, 'Paul Ehrenfest' (2003).

alleen de literatuur te lezen.⁴ De meest geavanceerde literatuur zou nooit gedetailleerd genoeg kunnen zijn om alle 'tacit components' van een nieuwe wetenschappelijke theorie of een experimentele uitvoering over te brengen.⁵ In de jaren twintig werden artikelen zo snel gepubliceerd, dat men nauwelijks tijd had om de uiterst gecompliceerde, nieuwe informatie te verwerken. Er werd geklaagd over de snelheid waarmee de artikelen onder druk van de toenemende buitenlandse concurrentie verschenen, en de daarmee samenhangende onvolledigheid en onduidelijkheid van de publicaties. Vaak was het onduidelijk welke theoretische resultaten bestaansrecht hadden binnen het nog wankele en zeer complexe quantumtheoretische bouwwerk. Bovendien raakte de theoretische natuurkunde meer dan ooit verstrikt in allerlei geavanceerde en exotische wiskunde. Ehrenfest merkte op dat onder fysici de behoefte toenam om door persoonlijke contacten en discussies bij te blijven en de wetenschap verder te ontwikkelen.⁶ Voor Ehrenfest was de toenemende behoefte aan persoonlijk contact een reden te meer om op het gebied van onderzoek en onderwijs de nadruk te leggen op een goed lopend colloquium, gevuld met buitenlandse sprekers. Hij verwoordde het belang van het colloquium als volgt: 'Der eigentliche Schwerpunkt eines THEORETISCH-physikalischen Betriebes liegt ja wegen der enorm schnellen Entwicklung unserer Wissenschaft ganz unzweifelhaft in einem lebendigen Colloquium.'⁷ Het Leidse colloquium was altijd levendig, en een voorbeeld voor colloquia over de hele wereld. Niet voor niets kwam Heisenberg op het Leidse colloquium voor het eerst zijn matrixmechanica uiteenzetten.

Studenten, collega's en Lorentz zelf spraken lovende woorden en prezen Ehrenfest keer op keer voor zijn inspanningen en geboekte successen. Maar zijn voortdurende worsteling met depressies en gevoelens van onzekerheid zorgden ervoor dat hij twijfelde aan zijn eigen vermogen bij te dragen aan de fysica. Naarmate de ontwikkelingen in de quantumtheorie ingewikkelder werden en elkaar sneller opvolgden,

⁴ Bezoeken van Heitler, Pauli, Wigner en London aan Leiden waren noodzakelijk, omdat men hun werk onmogelijk kon volgen door het alleen maar te lezen. Zie bijvoorbeeld: Ehrenfest aan Max Born, 5 oktober 1928, APE ESC 1, sectie 10.

⁵ Zie: Hoch en Platt, 'Migration and the denationalization of science' (1993) 133-152, m.n. 147; Polanyi, *Personal Knowledge* (1958); Ibid., *The Tacit Dimension* (1967); Hoch, 'Migration and the generation of new scientific ideas' (1985).

⁶ Zie bijvoorbeeld: Ehrenfest aan Randall, 26 juni 1928, ESC 8, sectie 9.

⁷ Ehrenfest aan J.D. Tamarkin, 25 mei 1928, APE ESC 9, sectie 8.

werd ook Ehrenfests onzekerheid groter. Zijn twijfel bracht hem tot de veronderstelling dat hij ‘alleen’ als kennismakelaar een rol kon spelen. Op dat gebied voelde hij zich thuis en daar lag ook zijn kracht als fysicus. Hij droeg sterk bij aan belangrijke discussies en zorgde voor verheldering tijdens conferenties en colloquia door het voortdurend stellen van kritische vragen. ‘Ihretwegen lud man ihn zu den Kongressen ein; denn mit ihm kam immer Klarheit und Schärfe in jede Diskussion’, zo stelde Einstein.⁸ Ehrenfest zag het juist in de roerige periode van de quantumrevolutie als zijn taak als scherpzinnige gids te fungeren door discussies en contacten te bevorderen. Zo kon hij naar zijn eigen idee toch een soort leidende rol vervullen. Zijn eigen bijdragen waren vooral kritisch van aard en betroffen veelal de grondslagen van de fysica; werkelijk creatieve noviteiten zijn amper op zijn conto te schrijven. Zijn voortdurende twijfel aan zijn eigen kunnen gaf een belangrijke impuls aan zijn streven de Leidse fysica te versterken door verdere internationalisering. Aan de andere kant waren het juist zijn toenemende twijfels en depressies die er voor zorgden dat de internationalisering en daardoor de theoretische fysica in Leiden aan het eind van de jaren twintig aan kracht begonnen in te boeten.

Internationalisering van de theoretische fysica

Lorentz waardeerde Ehrenfests energie en zijn inzet voor de studenten. Wanneer Ehrenfest zich weer eens over zijn slechte werk beklagde bij Lorentz, antwoordde Lorentz steevast opbeurend en met veel lof, met name over de bezielende invloed die Ehrenfest op de studenten had.⁹ Echter, Ehrenfest kon het gevoel dat zijn onderwijs te kort schoot niet van zich afschudden.

‘De physica is heerlijk – wanneer ik slechts betere hersenen en krachtigeren wil had, dan was ik er heel gelukkig. Heer Lorentz, of ik ooit iets vinden, iets construeren kan wat van blijvend waarde is dat weet ik niet en vrees zelfs duidelijk te kunnen zien, dat dat niet lukken zal; ook zie ik van jaar tot jaar duidelijker dat

⁸ Einstein, ‘Nachruf Paul Ehrenfest’ (1934) 95.

⁹ Zie bijvoorbeeld: Lorentz aan Ehrenfest, 8 december 1917, APE ESC 7, sectie 6.

mijn onderwijs nooit solide zijn kan – het zal steeds blijven een fragmentarisch en zeer zeer onsymmetrisch schetsen met verwaarloozing van groote zelfs fundamenteele gebieden. – Alles, wat U van mij hopen kunt is, dat ik mijn werkelijk groote liefde voor enkele vragen op enkele studenten overdraag, die daarvoor a priori “resonanzfähig” zijn. Meer kan ik niet – zelfs kan ik zij later wanneer zij op gang zijn niet meer steunen (in tegenstelling tot Bohr, Debije, Born etc.) slechts op gang brengen – daarna moeten zij bij u of anderen werken.’¹⁰

Eind jaren twintig, begin jaren dertig werd het gevoel dat hij tekortschoot sterker. Zijn vermeende onvermogen om de kwaliteit van de Leidse theoretische fysica hoog te houden, bracht hem ertoe oplossingen te bedenken om die kwaliteit op andere manieren te waarborgen. In 1919 begon hij een lobby om Debye of Einstein naar Leiden te krijgen. Hij schreef aan Lorentz:

‘Zooals U weet drijft mij steeds een gedachte: de toekomst van de natuurkunde in Leiden – door mijn wetenschappelijke werk zal ik nooit in staat zijn voldoende te helpen het niveau in staat te houden. Kwam iemand als Debije of natuurlijk – zoo dit mogelijk is – Einstein naar Leiden – ja dan was het mogelijk Leiden voor achteruitgang te bewaren.’¹¹

Ehrenfest had vernomen dat Debye overwoog zijn in Duitsland begonnen succesvolle carrière in Nederland voort te zetten, en schreef hem onmiddellijk aan. Want als het lukte om Debye naar Leiden te krijgen, dan zou de bloei van de Leidse natuurkunde weer voor 20 jaar gegarandeerd zijn, aldus Ehrenfest.¹² Toen hij met Kamerlingh Onnes over de theoreticus Debye sprak, leek deze in eerste instantie ook geïnteresseerd. Dat veranderde toen Ehrenfest begon te spreken over Debye als experimentator – de theoreticus Debye was zich steeds meer op het experimentele onderzoek gaan richten. Beducht voor verstoring

¹⁰ Ehrenfest aan Lorentz, 13 augustus 1919, Lorentzarchief, toegangsnummer 364, inv. nr. 20.

¹¹ Ehrenfest aan Lorentz, 8 september 1919, APE ESC 7, sectie 7.

¹² Ehrenfest aan Lorentz, 28 augustus 1919, Lorentzarchief, toegangsnr. 364, inv. nr. 20.

van zijn alleenheerschap op het experimentele lab, pleitte Onnes toen voor Einstein.

Het leek Ehrenfest mogelijk Einstein naar Leiden te krijgen, omdat hij had gehoord dat Einstein in Berlijn onvoldoende inkomsten had om zijn kinderen te kunnen onderhouden. Einstein wees het aanbod af – hij wilde zijn Berlijnse vakgenoten in de nasleep van de oorlog trouw blijven.¹³ Toen Einstein een lezing kwam geven, wilde Lorentz hem wel helpen door hem een honorarium van 1.000 gulden toe te stoppen.¹⁴ Ehrenfest vroeg zich af of het niet mogelijk was Einstein een aantal jaren lang steeds gedurende een paar weken per jaar naar Nederland te halen. Naar zijn mening zouden Lorentz, Onnes en Van Vollenhoven dit met hun contacten wel kunnen bewerkstelligen.¹⁵ Uitgerekend drie dagen na bekendmaking van de bevestiging van Einsteins algemene relativiteitstheorie schreef Kamerlingh Onnes – ervaren in het bespelen van de autoriteiten om geld en middelen los te peuteren – op 9 november 1919 het Leids Universiteits Fonds aan. Einstein had bij de constructie van zijn beroemde theorie gebouwd op het werk van Lorentz, aldus Onnes, en het zou een voorrecht zijn hem aan de universiteit te kunnen verbinden.¹⁶ Door bureaucratie en een persoonsverwisseling duurde het echter tot 27 oktober 1920 voordat Einstein te Leiden zijn oratie kon houden.¹⁷

De steeds snellere ontwikkeling en het gebruik van immer gecompliceerdere wiskunde binnen het raamwerk van de quantummechanica maakten het voor Ehrenfest steeds belangrijker dat hij in het leren van de nieuwe methoden kon worden geholpen. Vandaar dat hij probeerde door middel van frequent persoonlijk contact met vooral zijn oud-studenten bij te blijven in de theoretische fysica. Al in de vroege jaren twintig werd de in Delft werkzame Burgers door Ehrenfest geregeld om hulp gevraagd. Burgers kon bij de allernieuwste ontwikkelingen echter niet helpen; doordat hij vanaf 1919 in Delft als hoogleraar aero- en hydrodynamica was aangesteld, had hij het contact

¹³ Lorentz aan Ehrenfest, 22 september 1919, APE ESC 7, sectie 7.

¹⁴ Lorentz aan Ehrenfest, 23 september 1919, APE ESC 7, sectie 7.

¹⁵ Ehrenfest aan Lorentz, 25 september 1919, Lorentzarchief, toegangsnr. 364, inv. nr. 20.

¹⁶ Van Delft, 'Albert Einstein in Leiden' (2006) 57-62, m.n. 60.

¹⁷ De procedure en verwickelingen rond Einsteins aanstelling in Leiden zijn uitvoerig onderzocht door Jeroen van Dongen in het kader van zijn werk als associate editor aan de *Einstein Papers*. Zijn onderzoek is opgenomen in: EP 10, xliii-xlvi.

met het frontgebied van de quantumtheorie verloren. Ehrenfest en Coster wilden wel profiteren van Burgers' wiskundige capaciteiten, en zetten zich in Burgers terug te winnen voor de theoretische fysica door te proberen hem in Amsterdam aangesteld te krijgen.¹⁸

Ehrenfest maakte zich bij Lorentz sterk voor het plan om Fokker als opvolger van Lorentz te nemen voor de positie als curator van Teylers' Stichting. Daarbij zou het gewenst zijn Fokker een onbezoldigde buitengewone of bijzondere leerstoel te Leiden te bezorgen. Daarbij zouden twee vliegen in een klap worden geslagen. Ten eerste zou *de facto* een theoretisch professoraat met een gezonde experimentele achtergrond worden geschapen, zonder dat het de staat iets zou kosten. Ten tweede zou Fokker hulp kunnen bieden bij de scholing van studenten. Ehrenfest meende wel de jongeren te kunnen interesseren voor de theoretische fysica en te kunnen helpen met hun eerste schreden op dit pad. 'Aber es bleibt eine beträchtliche Anzahl anderer Studenten die wirklich auch die theoretische Physik lieben aber einen wesentlich andere Art haben als ich selber – Leute aus denen Sie sehr Tüchtige Leute machen würden, während sie durch mich nicht in Gang gehalten werden können.'¹⁹ Ehrenfest was zich ervan bewust dat het voor hem onmogelijk was samen te werken met jonge fysici die meteen naar ingewikkelde wiskunde grepen zonder een probleem eerst op een grondige fysische manier te overdenken en te bediscussieren, zoals we zullen zien. Samenwerking met Fokker zou ook deze 'wiskundig' opererende fysici kunnen vormen.²⁰ Van een professoraat voor Fokker kwam het echter voorlopig niet. Maar toen met het overlijden van Lorentz op 4 februari 1928 Ehrenfests steun en toeverlaat in wetenschappelijke en organisatorische kwesties definitief wegviel, zocht Ehrenfest wederom naarstig naar verdere ondersteuning. Op 26 september 1928 werd Fokker bijzonder hoogleraar te Leiden. Ehrenfest zorgde er ook voor dat zijn voormalige student Hans Kramers,

¹⁸ Ehrenfest aan J.M. Burgers, 13 & 23 maart 1923, 11 juli 1926, 6 & 13 mei 1928, BA.

¹⁹ Ehrenfest aan Lorentz, 1 januari 1924, Lorentzarchief, toegangsnr. 364, inv. nr. 20.

²⁰ Ehrenfest aan Lorentz, 1 januari 1924, Lorentzarchief, toegangsnr. 364, inv. nr. 20.

hoogleraar in Utrecht, na de dood van Lorentz iedere dinsdag een uur college kwam geven in Leiden.²¹

Echt helpen met de mathematische noviteiten binnen de quantummechanica konden Burgers, Fokker en Kramers niet. Toen de Groningse universiteit de getalenteerde mathematicus Bartel van der Waerden een leerstoel aanbood, ondersteunde Ehrenfest dit aanbod dan ook van harte. Ehrenfest stuurde Van der Waerden een enthousiaste brief, waarin hij hem vroeg Göttingen te verlaten en in Groningen iets nieuws op te zetten, en aanbiedingen van Rostock en Breslau af te wijzen. Door Ehrenfests bemiddeling, gepaard gaande met vele spoedbrieven, telegrammen, telefoongesprekken en reizen, lukte het Van der Waerden aan Groningen te verbinden. Nauwelijks was deze aangesteld, of Ehrenfest kwam al bij hem op bezoek om hem te ondervragen over de 'Gruppenpest'; de toepassing binnen de fysica van de door Ehrenfest als verderfelijk ervaren wiskundige groepentheorie. Het viel Ehrenfest zwaar de relevante informatie over groepentheorie te destilleren uit het toen pas verschenen boek van Herman Weyl: *Gruppentheorie und Quantenmechanik*.²² Fysici hadden moeite met het boek, dat zo moeilijk was dat maar weinigen het begrepen.²³ Niet alleen Ehrenfest had bezwaren tegen de groepentheoretische aanpak. De groepentheorie werd door een aantal fysici gezien als 'nicht physikalisch'.²⁴ Om de groepentheorie beter te begrijpen, organiseerde Ehrenfest een serie lezingen door Wigner, Pauli, Heitler, London, Von Neumann en Van der Waerden. Ehrenfest vroeg Van der Waerden of deze een bepaald onderdeel in de groepentheorie kon formaliseren, zodat er makkelijk mee kon worden gerekend. Dit stuk groepentheorie was al impliciet of expliciet aan bod gekomen in het werk van Pauli, Wigner, Weyl en

²¹ Ehrenfest aan Bohr, 15 maart 1928, APE ESC 1, sectie 7; A.D. Fokker aan P. Zeeman, 10 mei 1929, A.D. Fokker aan Ehrenfest, 11 juni 1929, APE ESC 4, sectie 7; Ehrenfest aan Paul jr, 6 december 1929, APE EPC 1, sectie 7.

²² Ehrenfest aan B.L. van der Waerden, 13 juli 1928; B.L. van der Waerden aan Ehrenfest, 20 juli & 1 oktober 1928; Ehrenfest aan B.L. van der Waerden, 8 & 21 oktober 1928, 13 januari 1929, APE ESC 10, sectie 6.

²³ Aldus verklaarde Van der Waerden, in: Dold-Samplonius, 'Interview with Bartel Leendert van der Waerden' (1997) 313-320, m.n. 316. Ook Born en Jordan vonden het boek van Weyl een 'inhaltreichen aber schwierigen Werk'. Zie: Born en Jordan, *Elementare Quantenmechanik* (1930) vii.

²⁴ Wigner, *Gruppentheorie und ihre Anwendung* (1931) v. Volgens Wigner zouden de groepentheoretische symmetrieeigenschappen echter meer fysisch moeten aanspreken dan de rekenkundige benadering.

Dirac. Van der Waerden ontwikkelde de regels voor wat door Ehrenfest werd gebombardeerd tot 'Spinoren'. Het artikel waarin de spinorrekening verscheen, was gericht op de fysici en was op verzoek van Ehrenfest pragmatisch van opzet. Het bevatte geen onderliggende theorie of afleidingen en gaf enkel weer hoe spinoren moest worden gehanteerd.²⁵ Toen Van der Waerden begin 1930 de mogelijkheid had om hoogleraar te Göttingen te worden, was Ehrenfest al druk bezig hem in Leiden aangesteld te krijgen als opvolger van de gepensioneerde Kluyver.²⁶ Ondanks Ehrenfests voortdurende gelobby, vertrok Van der Waerden in mei 1931 naar Leipzig om daar te gaan samenwerken met twee topfysici op het gebied van de quantummechanica, namelijk Werner Heisenberg en Friedrich Hund.²⁷

Structureel leverden de hierboven vermelde pogingen om de Leidse fysica te ondersteunen niet veel op. Einstein kwam weinig en voor korte periodes. Burgers was met andere zaken bezig, en was net als Kramers veel tijd kwijt met zijn eigen onderzoek en onderwijs. Fokkers belangstelling lag vooral op het vlak van de relativiteitstheorie en hij had weinig aansluiting met het quantumfysisch onderzoek. Van der Waerden kon gedeeltelijk helpen, maar zat in het verre Groningen. Bovendien was hij na drie jaar alweer naar het buitenland vertrokken. Wel leverde Ehrenfests ijver een zeker prestige op voor de Leidse fysica, en onder studenten en collega's droeg de komst van Einstein, Kramers, Fokker en Van der Waerden zeker bij aan een dynamisch beeld van het theoretisch instituut.

Leerlingen als exportproduct

Mede verantwoordelijk voor de goede reputatie van Ehrenfests instituut waren, zoals gezegd, de successen van de studenten. Ehrenfest deed er in Leiden alles aan om zijn studenten zo snel en goed mogelijk klaar te

²⁵ Ehrenfest zegt dit expliciet: Ehrenfest aan P. Epstein, 20 oktober 1929, APE ESC 4, sectie 1; Zie ook: Schneider, 'A service for the physicists? B.L. van der Waerden's early contributions' (2008) 327-343, m.n. 330-331; Pais, *Inward bound* (1986) 292; Van Dongen, 'Einstein's Methodology' (2004) 219-254.

²⁶ Ehrenfest aan H. Bohr, 20 oktober 1929, APE ESC 1, sectie 5; Ehrenfest aan R. Courant, 7 februari 1930, R. Courant aan Ehrenfest, 9 februari 1930, APE ESC 3, sectie 2.

²⁷ Ehrenfest aan B.L. van der Waerden, 6 februari & 14 maart 1930, APE ESC 10, sectie 7.

stomen voor het veroveren van een plek aan het front van de wetenschap. Hij bemiddelde om in het buitenland posities voor hen te verwerven. Vooral de VS waren een dankbaar afzetgebied. Ehrenfest had bijzonder goede contacten met zijn Amerikaanse collega's. Hij merkte eens op dat de belangrijkste rechtvaardiging voor zijn veelvuldige reizen naar de VS lag in het netwerk dat hij voor zijn leerlingen aanlegde.²⁸ In Amerika werd veel geld gepompt in de theoretische fysica en waren er volop mogelijkheden voor jonge natuurkundigen. Mogelijkheden waar Goudsmit en Uhlenbeck van konden profiteren. Toen Walter Colby in het voorjaar van 1927 naar Europa kwam om iemand te zoeken die de in Ann Arbor, Michigan werkende Oskar Klein kon opvolgen, kwam hij ook bij Ehrenfest langs. In bijzijn van Goudsmit en Uhlenbeck hield Ehrenfest een vurig pleidooi voor het aannemen van niet één, maar twee of meer fysici. Ann Arbor was verstoken van andere theoretisch natuurkundigen, en een enkele fysicus zou daar niemand hebben om mee te discussiëren. Dat betekende volgens Ehrenfest dat de wetenschappelijke ontwikkeling zou stagneren. Hij maakte met zijn pleidooi een enorme indruk op Colby, die enkele weken later zowel Goudsmit als Uhlenbeck een baan aanbood. Beiden accepteerden.²⁹ In Ann Arbor was echter niet veel geld beschikbaar voor buitenlandse reizen – volgens Ehrenfest van levensbelang voor fysici. Toen Goudsmit via de Amsterdamse fysicus Pieter Zeeman werd gevraagd of hij Schrödinger te Zürich wilde opvolgen, maande Ehrenfest Goudsmit die positie te accepteren. De decaan te Ann Arbor werd door de gewiekste Ehrenfest ook op de hoogte gebracht van het advies aan Goudsmit. Vrijwel meteen werd in Ann Arbor Goudsmits salaris verdubbeld, kregen diens organisatorische plannen bijval en kwamen middelen beschikbaar waardoor frequenter reizen naar het buitenland mogelijk werd. Ehrenfest raadde Goudsmit aan met dit resultaat tevreden te zijn en in Ann Arbor te blijven.³⁰ Ehrenfest hielp met zijn internationale bemiddelingen veel van zijn studenten aan een baan, tot tevredenheid van Lorentz, die aan zijn opvolger schreef: 'Dank zij Uwe bemoeiingen vinden langzamerhand heel wat jonge Nederlanders hun weg.'³¹

²⁸ Ehrenfest aan P.J. Idenburg, 13 november 1930, APE ESC 5, sectie 9.

²⁹ Pais, *The Genius of Science* (2000) 308-309.

³⁰ Randall aan Ehrenfest, 20 juni 1928; Ehrenfest aan Randall, 26 juni 1928, APE ESC 8, sectie 9; Ehrenfest aan G. Dieke, 5 juli 1928, APE ESC 3, sectie 4; Ehrenfest aan Arthur Ehrenfest, 28 augustus 1928, APE EPC 1, sectie 6.

³¹ Lorentz aan Ehrenfest, 18 januari 1927, APE ESC 7, sectie 8.

Maar doordat Ehrenfest al zijn studenten wegzond, raakte hij in toenemende mate geïsoleerd in Leiden. In 1928 en 1929 klaagde hij dat hij alleen was.³² Al zijn studenten waren voor verdere studie of werk naar het buitenland. Er diende zich niet meteen een nieuwe, kwalitatief hoogstaande lichter student in de theoretische fysica aan. Het aantal natuurkundestudenten was toch al laag. Ehrenfest had dringend behoefte aan goede studenten, als sparringpartners bij het begrijpen van de nieuwe ontwikkelingen. Tegelijkertijd had hij in deze periode zelf steeds vaker hulp nodig bij het leren van de nieuwe natuurkunde. Vanaf 1925 leunde hij voor uitleg en het uitvoeren van de complexe wiskundige berekeningen in toenemende mate op zijn pupillen.³³ Het gevolg was dat Ehrenfests internationale aspiraties begonnen te wringen met zijn wens om de Leidse fysica op peil te houden. Periodes van groot internationaal enthousiasme wisselden af met de wens zijn studenten zo dicht mogelijk bij zich te houden.

Dit begon tamelijk onschuldig. Ehrenfests student Kramers had al een paar jaar een baan als lector in Kopenhagen, waar hij samenwerkte met niemand minder dan Niels Bohr. In 1919 had Ehrenfest al tevergeefs geprobeerd de wiskundig begaafde Kramers als assistent naar Leiden te halen.³⁴ In 1926 werd Kramers door Ehrenfest aan een Utrechtse leerstoel geholpen. Al was Kramers nu wel verstoken van direct contact met Bohr en consorten, het hoogleraarschap betekende zeker een verbetering in positie en salaris. Maar Ehrenfests actie was niet alleen maar gericht op het heil van zijn voormalige student. Vrijwel direct na zijn aanstelling werd Kramers door Ehrenfest met allerlei hulpvragen bestookt. Ehrenfest zette zich in om gedaan te krijgen dat Kramers ook nog in Leiden college kwam geven. Hetzelfde overkwam Ehrenfests leerling Dieke. Dieke werkte twee jaar in de VS en werd daarna in Groningen als lector aangesteld.³⁵ Daar ontving ook hij de nodige hulpvragen van Ehrenfest. Hij wilde dat Dieke terugkeerde naar Leiden. Die was in de VS gepromoveerd, maar Ehrenfest probeerde hem te

³² Ehrenfest aan D. Coster, 23 augustus 1928, APE ESC 3, sectie 1; In 1929 was Casimir in Kopenhagen, Florin was in schooldienst gegaan en Uhlenbeck zat in Utrecht bij Kramers. Zie: Ehrenfest aan L. Nordheim, 28 september 1929, APE ESC 8, sectie 1.

³³ G.E. Uhlenbeck, interview door T.S. Kuhn, 9 december 1963, in: Pais, *The genius of science* (2000) 294.

³⁴ Lorentz aan Ehrenfest, 12 maart 1919, APE ESC 7, sectie 7.

³⁵ G. Dieke aan Ehrenfest, 20 januari 1928, APE ESC 3, sectie 2; Ehrenfest aan J.D. Tamarkin, 25 mei 1928, APE ESC 9, sectie 8.

bewegen alsnog ook in Leiden te promoveren. Hij had normaal gesproken een afkeer van dit soort in zijn ogen onzinnige formaliteiten, maar kennelijk woog het belang van de Leidse fysica hier zwaarder voor hem.³⁶ Een half jaar later kreeg Dieke in Baltimore een positie in de theoretische fysica aangeboden. Deze baan was velen malen beter dan op dat moment in Nederland geboden kon worden.³⁷ Ehrenfest was blij weer een Nederlander naar Amerika te kunnen exporteren, en voorzag Dieke van een dosis vaderlijk advies, zoals alleen hij die kon geven. Hij raadde Dieke aan nog niet te trouwen, en gaf zijn argumenten daarvoor: 'Falls Du Dich nur erst einer europäische Frau verbindet, bist Du nicht mehr für Amerika zu gebrauchen. ... Eine nichtabschraubbare amerikanische Frau kann eventuell eine Erschwerung bedeuten. Aber Frauen bedeuten immer eine Erschwerung.'³⁸ Dieke werd begin 1930 in Baltimore aangesteld, maar het beloofde nieuwe laboratorium viel tegen. Ehrenfest reageerde onmiddellijk met een brief. Hierin bood hij Dieke de mogelijkheid de komende twee jaar te Leiden zijn assistent te worden.³⁹ Dit was een absurde wanhoopspoging om Dieke terug naar Leiden te krijgen, want dat zou een radicale achteruitgang in positie en salaris betekenen.⁴⁰ Toen het een half jaar later duidelijk werd dat Dieke in Baltimore zou blijven, probeerde Ehrenfest zijn leerling en assistent Rutgers bij Dieke als assistent te plaatsen.⁴¹

In maart 1929 stuurde Ehrenfest zijn zeer getalenteerde student Hendrik Casimir voor verdere vorming naar Bohr in Kopenhagen. Al snel maakte Casimirs afwezigheid het voor Ehrenfest moeilijker te blijven functioneren.⁴² Hij had geen goede studenten over om het assistentschap op zich te nemen. Hij wilde proberen Casimir terug te halen uit Kopenhagen, maar wilde ook zijn dochter Tanja, die wiskunde studeerde, wel het assistentschap aanbieden om hem te helpen met het

³⁶ Ehrenfest aan Tamarkin, 25 mei 1928, APE ESC 9, sectie 8; Ehrenfest aan G. Dieke, 19 juli 1928, G. Dieke aan Ehrenfest, 24 juli 1928, APE ESC 3, sectie 2; Ehrenfest aan G. Dieke, 23 augustus 1928, APE ESC 3, sectie 4.

³⁷ G. Dieke aan Ehrenfest, 13 mei 1929; Wood aan Dieke, 3 mei 1929, APE ESC 3, sectie 4.

³⁸ Ehrenfest aan G. Dieke, 13 mei 1929, APE ESC 3, sectie 4.

³⁹ G. Dieke aan Ehrenfest, 16 februari 1930; Ehrenfest aan G. Dieke, ca. 20 februari 1930, APE ESC 3, sectie 5.

⁴⁰ Omgerekend bedroeg Diekes beginsalaris in de VS jaarlijks 8700 gulden; het salarismaximum van een assistent in Leiden bedroeg een karige 1200 gulden.

⁴¹ G. Dieke aan Ehrenfest, 7 mei 1930, APE ESC 3, sectie 5.

⁴² Ehrenfest aan D. Coster, 15 mei 1929, APE ESC 3, sectie 1.

begrijpen van de nieuwe ontwikkelingen. Maar om dezelfde redenen dat hij zijn studenten naar betere oorden stuurde, kon hij het haar ook niet aanraden naar Leiden te komen. Hij beval haar aan om naar Born in Göttingen te vertrekken.⁴³

Ten einde raad reisde Ehrenfest Casimir naar Kopenhagen achterna. Van tevoren stuurde hij een gedetailleerd overzicht van de onderwerpen waarover hij tijdens zijn bezoek wat wilde horen van zijn student.⁴⁴ Uiteindelijk vroeg hij Casimir terug te keren om hem bij te staan. Casimir kwam plichtsgetrouw, doch met flinke tegenzin terug naar Leiden.⁴⁵

Anderhalf jaar later was Ehrenfest weer blij Casimir naar Zürich te kunnen sturen om assistent bij Pauli te worden. Het ging Casimir aan het hart dat het na zijn vertrek wel erg leeg zou worden in Leiden. Liever zag hij Ehrenfest omringd door, zoals hij zei, een 'leergierige schaar springlevende theoreticusjes [*sic*].'⁴⁶ Wederom waren er geen goede studenten theoretische fysica meer en Ehrenfest stond er dus alleen voor. Toch liet hij Casimir weer gaan, maar schreef in mei 1933 zijn leerling zijn meest dringende oproep tot dan toe:

'Mein lieber Casimir! Es hat mir endloses Kopfzerbrechen (oder genauer Gemütsbedenken) gekostet, ehe ich zu dem Beschluss kam Dich nun entschieden zu bitten als mein Assistent nach Leiden zurück zu kommen. Du WEISST wie stark ich stets die Interessen der jungen Leute (nach bestem Wissen) gegen andere Interessen wägen lasse. NUN aber bitte ich Dich zurück zu kommen.- Im Interesse der Leidner theoretischen Abteilung, im Interesse aller Jungens im Laboratorium, [...] und – mir zu liebe.'⁴⁷

Nu was Casimir op zoek naar een positie, en de mogelijkheden waren overal schaars. Hij hoorde van de mogelijkheid om in Nazi-Duitsland bij Heisenberg te gaan werken – daar was nu plaats in overvloed nadat veel joodse medewerkers waren ontslagen. Casimir overwoog dit serieus. Hij

⁴³ Ehrenfest aan Tanja Ehrenfest, 27 oktober 1929; Ehrenfest aan Tanja Ehrenfest, 5 januari 1930, APE EPC 1, sectie 7.

⁴⁴ Ehrenfest aan H.B.G. Casimir, 16 november 1929, APE ESC 2, sectie 8.

⁴⁵ H.B.G. Casimir aan Ehrenfest, 16 maart 1930, APE EPC 2, sectie 8.

⁴⁶ H.B.G. Casimir aan Ehrenfest, 24 juni 1932, APE EPC 2, sectie 9.

⁴⁷ Ehrenfest aan H.B.G. Casimir, 15 mei 1933, APE ESC 2, sectie 9.

haalde zich hiermee de woede van Ehrenfest op de hals, die in de kantlijn van Casimirs brief ontplofte: 'Nun habe ich für 95% die Geduld verloren – Ich möchte wissen wie Lorentz nun urteilen würde.'⁴⁸ In september keerde Casimir andermaal uit het buitenland terug om Ehrenfest in Leiden bij te staan.

Om zijn eigen kennis bij te spijkeren, ondernam Ehrenfest zelf vele buitenlandse reizen, terwijl deze hem ook de gelegenheid boden om zijn stokpaardje – discussie en kennisoverdracht – te berijden. Vanaf midden jaren twintig werden buitenlandse reizen vooral een manier om zijn problemen te ontvluchten. Eenmaal in het buitenland leek zijn depressie als sneeuw voor de zon te zijn verdwenen. Op een van zijn reizen nam hij zijn zoon mee: 'Pawlik wundert sich immer wieder, dass ich der ewig brummrige Papa, hier ununterbrochen so fröhlich bin. Gestern habe ich in der That schrecklich viel über lauter wirklich inhaltslose Dummheiten gelacht.'⁴⁹ Eenmaal terug in Leiden kwam zijn depressie altijd des te harder terug. Hij plande voor 1930 een lange reis naar Amerika en vroeg geld bij het Lorentzfonds om Rutgers als assistent mee te kunnen nemen. Het Lorentzfonds was op 12 januari 1926 opgericht met als doel de bevordering van de theoretische natuurkunde. Ehrenfest, Fokker en Zeeman namen zitting in het curatorium. In het geval van het vertrek van Rutgers naar Amerika moest Krans, die samen met Rutgers het assistentschap deelde, het hele assistentschap waarnemen. Fokker, die de theoretische natuurkunde in dat geval helemaal in zijn eentje draaiende moest houden, kwam in opstand. Krans kostte volgens Fokker meer tijd dan hij uitspaarde. (Krans, volgens Casimir 'niet bijster vlug van begrip'⁵⁰ had bovendien voortdurend problemen met het afmaken van zijn proefschrift.) Rutgers kon niet worden gemist, en bovendien was er in Europa volop gelegenheid gevormd te worden, bijvoorbeeld bij Pauli, Fermi of Bohr. Maar volgens Ehrenfest was Rutgers niet rijp voor Bohr, niet ver genoeg om naar Pauli te gaan (die beschikte al over de begaafde assistenten Peierls en Bloch, en daartussen zou Rutgers maar ontmoedigd raken) en in Rome bestond geen goed werkklimaat. Juist het Amerikaanse Ann Arbor, bij Goudsmit, Uhlenbeck en Dieke, zou een impuls kunnen geven. Rutgers 'eigenart' zou in Europa geen kans krijgen, maar zou in de VS

⁴⁸ H.B.G. Casimir aan Ehrenfest, 18 mei 1933, APE ESC 2, sectie 9.

⁴⁹ Ehrenfest aan dochters, 9 juli 1929, APE EPC 1, sectie 7.

⁵⁰ Casimir, *Haphazard reality* (1983) 79.

zeer goed kunnen floreren.⁵¹ Fokker liet zich niet vermurwen, en weigerde enige vorm van subsidie uit het Lorentzfonds. De eigenzinnige Ehrenfest zette Fokkers bezwaren opzij door eenvoudigweg het Lorentzfonds te passeren. Met succes vroeg hij het Vollenhovenfonds om geld voor Rutgers.⁵²

Met Ehrenfests bezoek aan de Verenigde Staten van juni 1930 tot februari 1931 zette de aftakeling van de Leidse theoretische fysica verder door. Fokker bleef alleen met Krans achter, en probeerde in de tussentijd zonder veel succes de geheimen van het tollende waterstofatoom te doorgronden. Fokker kon de quantummechanica niet helemaal begrijpen, en Krans was niet in staat hem daarbij te helpen. Het Amerikaanse werkklimaat bleek overigens niet zo gunstig op Rutgers te werken als Ehrenfest dacht; Rutgers keerde gedesillusioneerd terug uit Amerika en ontvluchtte de problemen van de theoretische fysica door een baan te accepteren aan het experimentele laboratorium van de Amsterdamse fysicus Michels.⁵³

Bezoeken

In de jaren twintig toog een aanzwellende stroom buitenlandse onderzoekers naar Leiden, aangetrokken door de inmiddels opgebouwde faam van het Leidse instituut en de stimulerende invloed van de charismatische Ehrenfest. Ehrenfest bleef door deze bezoeken op de hoogte van de internationale ontwikkelingen. Ook achtte hij deze bezoekers van levensbelang voor de ontwikkeling van zijn studenten, die met de bezoekende fysici samenwerkten aan de nieuwste onderwerpen en tijdens colloquia met hen in discussie konden gaan. Maar al snel begonnen Ehrenfests eeuwige twijfel en zijn depressieve periodes hier roet in het eten te gooien. Het resultaat was dat de stroom onderzoekers stagneerde, met alle gevolgen van dien.

⁵¹ Ehrenfest aan A.D. Fokker, 24 april 1930; A.D. Fokker aan Ehrenfest, 26 april 1930; Ehrenfest aan A.D. Fokker, 27 april 1930, APE ESC 4, sectie 5.

⁵² A.D. Fokker aan Ehrenfest, 13 mei 1930, APE ESC 4, sectie 5.

⁵³ A.D. Fokker aan Ehrenfest, 12 december 1930, APE ESC 4, sectie 5; A.J. Rutgers aan Ehrenfest, 21 oktober 1930, APE ESC 9, sectie 2.

Het Theoretisch Instituut in haar gouden dagen, 1926. Van links naar rechts, voorste rij: Uhlenbeck, Honl, Florin, een student, Fokker, Kramers, Goudsmit. Achterste rij: Niessen, Dirac, een student, Oppenheimer, Polak, een student, Tatyana Ehrenfest, Paul Ehrenfest, Woltjer.

AIP Emilio Segre Visual Archives, Uhlenbeck Collection

In 1916 kwam de Finse fysicus Gunnar Nordström naar Leiden en zou hier tot 1918 blijven.⁵⁴ In 1918 keerde hij naar Helsinki terug met zijn vrouw, de natuurkundige Cornelia van Leeuwen. Zoals al vermeld waren tussen 1919 en 1921 achtereenvolgens Trkal, Epstein en Breit werkzaam als assistent van Ehrenfest.⁵⁵

Fermi bezocht in 1924 Leiden met een beurs van de International Education Board. Voor de jonge, onzekere Fermi was het

⁵⁴ Zie hierover ondermeer: Halpern, 'Nordström, Ehrenfest, and the role of dimensionality in physics', (2004).

⁵⁵ Van Lunteren, 'Paul Ehrenfest: de Leidse onderzoekschool van een fysicus in diaspora' (2003).

verblijf in Leiden een verkwikkende ervaring. Ehrenfest waardeerde het werk van Fermi zeer, wat deze het nodige zelfvertrouwen bezorgde.⁵⁶

In 1924 was de Amerikaans-Duitse fysicus Ralph de Laer Kronig op uitnodiging van Ehrenfest naar Leiden gekomen. Kronig had in de VS de spectroscopie bestudeerd. Eenmaal in Leiden schreef hij samen met Goudsmit een artikel over de theoretische afleiding van intensiteit-somregels.⁵⁷ Vanaf 1930 zou Kronig een bloeiende carrière opbouwen in Nederland.⁵⁸

Een belangrijke financiële ondersteuning voor internationale bezoeken werd vanaf 1926 gevonden in het Lorentzfonds. Het fonds had jaarlijks 7.000 tot 10.000 gulden tot haar beschikking. Daaruit werden voor een belangrijk deel reis- en verblijfskosten van (buitenlandse) gasten betaald en de kosten van de veelal buitenlandse sprekers op Ehrenfests colloquium.⁵⁹

De eerste die hiervan profiteerde, was Oskar Klein. Klein, een student van Bohr, poogde in april 1926 de resultaten van de nieuwe quantummechanica te koppelen aan de effecten van een vijfde dimensie. Ehrenfest hoorde van Kleins werk en nodigde hem voor juni 1926 uit om naar Leiden te komen. Ehrenfest en Uhlenbeck spraken die hele zomer vrijwel elke dag met Klein over zijn werk.⁶⁰ In augustus dat jaar publiceerden Ehrenfest en Uhlenbeck een artikel over Kleins theorie.⁶¹

In 1927 ontving een enthousiaste Ehrenfest een fysicus als Atkinson, die naar Leiden kwam om zich verder te ontwikkelen in de natuurkunde.⁶² Begin mei 1928 echter rapporteerde Ehrenfest dat hij moe, gedeprimeerd en vooral mensenschuw was. Op zelfs de eenvoudigste vragen meende hij geen antwoord te kunnen geven. Samen met de jonge experimentele fysicus Nijhoff maakte hij een lange autoreis

⁵⁶ Segrè, *Enrico Fermi* (1970) 34, 36.

⁵⁷ Goudsmit en De Laer Kronig, 'Die Intensität der Zeemankomponenten' (1925).

⁵⁸ M&R 1.2, 690.

⁵⁹ A.D. Fokker aan Ehrenfest, 29 maart 1928, APE ESC 4, sectie 4; A.D. Fokker aan Ehrenfest, 3 juli 1931, APE ESC 4, sectie 5.

⁶⁰ Halpern, 'Nordström, Ehrenfest, and the role of dimensionality in physics' (2004) m.n. 397.

⁶¹ P. Ehrenfest en G. E. Uhlenbeck, 'Graphische Veranschaulichung der De Broglieschen Phasenwellen in den fünfdimensionalen Welt von O. Klein', *Zeitschrift für Physik* 39 (1926) 495-498.

⁶² Ehrenfest aan B. van der Pol, 25 juli 1927, APE ESC 8, sectie 8.

om de bezoekers te ontvluchten.⁶³ In het wintersemester zouden de jonge theoretici London, Wigner en Von Neumann naar Leiden komen. Ehrenfest had spijt van de uitnodigingen en wilde zich het liefst ergens verschuilen waar absoluut geen mensen waren.⁶⁴ Eind mei, schijnbaar opgeknapt van zijn korte vakantie, was dat veranderd en schreef hij niet te kunnen wachten op het bezoek van Tamm en Dirac in juni. De Russische Igor Tamm – latere Nobelprijswinnaar – was goed bevriend met Dirac, verstond de kunst de ondoorgroendelijke Dirac te begrijpen en kon zodoende als wetenschappelijke tolk optreden. Ehrenfest nodigde V.A. Fock uit om mee te profiteren van de combinatie Tamm-Dirac.⁶⁵ In januari 1928 was Tamm al voor enkele maanden naar Leiden gekomen, eveneens met financiële ondersteuning van het Lorentzfonds. Zodoende kon Tamm Ehrenfest en diens leerlingen invoeren in de geheimen van het werk van Dirac. Ehrenfest beschouwde Tamm als een van de grootste talenten in de theoretische fysica. Hij schreef Joffe zelfs in Tamm een ideale opvolger te zien.⁶⁶ In 1928 zou ook Kronig met geld van het Lorentzfonds voor tien maanden naar Nederland komen.⁶⁷

Die stemming was in september inmiddels weer omgeslagen, toen Ehrenfest zijn collega Coster te Groningen vroeg vooral geen bezoekers meer door te sturen naar Leiden. Ehrenfest vreesde zelfs dat ‘Leiden’ in de toekomst in het geheel geen bezoekers zou kunnen ontvangen.⁶⁸ Begin oktober is Ehrenfest juist weer zeer enthousiast over de bezoeken van Heitler, Pauli, Wigner en London, die elkaar in rap tempo opvolgden.⁶⁹

Diezelfde maand arriveerde de jonge fysicus Walter Elsasser uit Göttingen als opvolger van Ehrenfests assistent Uhlenbeck.⁷⁰ Dit bezoek zou rampzalig verlopen en luidde een periode in waarin Ehrenfest steeds meer een rem begon te zetten op het aantal bezoekers dat naar Leiden kwam. Elsassers manier van werken bleek al snel totaal anders dan die van Ehrenfest. Ehrenfest verbood hem daarom bij discussies met andere

⁶³ Ehrenfest aan A.F. Joffe, 5 mei 1928, APE ESC 6, sectie 1.

⁶⁴ Ehrenfest aan D. Coster, 23 augustus 1928, APE ESC 3, sectie 1

⁶⁵ Ehrenfest aan V.A. Fock, 20 mei 1928, APE ESC 4, sectie 2.

⁶⁶ Ehrenfest aan A.F. Joffe, 13 april 1928, APE ESC 6, sectie 1; Van Lunteren, ‘Paul Ehrenfest’ (2003).

⁶⁷ A.D. Fokker aan Ehrenfest, 29 maart 1928, APE ESC 4, sectie 4; A.D. Fokker aan Ehrenfest, 3 juli 1931, APE ESC 4, sectie 5.

⁶⁸ Ehrenfest aan D. Coster, 4 september 1928, APE ESC 3, sectie 1.

⁶⁹ Ehrenfest aan M. Born, 5 oktober 1928, APE ESC 1, sectie 10.

⁷⁰ Casimir, *Haphazard reality* (1983) 78; Van Lunteren, ‘Paul Ehrenfest’ (2003).

studenten aanwezig te zijn, en Elsasser werd twee maanden lang als secretaris opgesloten in de leeskamer van het instituut, waar hij in plaats van aan ingewikkelde wiskunde aan de administratie werd gezet.⁷¹ De situatie schijnt te zijn geëscaleerd toen Elsasser de fout maakte na een kappersbezoek enigszins geparfumeerd bij Ehrenfest te verschijnen. Ehrenfest had een grondige hekel aan tabak, alcohol en parfum, en wees Elsasser op grove wijze de deur. Toen Elsasser tussen de bedrijven door een bezoek bracht aan Göttingen, bedacht Ehrenfest een smoes. Born zou Elsasser met diverse aangelegenheden zo lang in Göttingen ophouden, dat Elsasser pas in april – aan het eind van zijn beurs – kon terugkeren naar Leiden, enkel om zijn spullen op te halen.⁷² Het ‘parfumincident’ was blijkbaar de druppel die de emmer had doen overlopen, hoewel Elsasser meende dat het de enige reden was waarom hij door Ehrenfest werd geweerd. Doorslaggevender is echter de constatering dat Elsassers denkstijl en manier van fysica bedrijven niet bij die van Ehrenfest aansloot. Immers, voor vrienden en geestverwanten maakte Ehrenfest uitzonderingen, zoals ook voor zijn student Casimir, met wie Ehrenfest een innige werkverhouding had. Casimir wist zijn kapper op een keer niet op tijd te weerhouden van het toepassen van een geparfumeerd haarsmeersel. Met knikkende knieën verscheen hij bij Ehrenfest, die tegen alle verwachtingen in geamuseerd opmerkte: ‘Du duftest wie eine Frühlingsblume.’⁷³

Toen de in Washington werkzame Georg Breit in mei 1928 schreef naar Leiden te willen komen om zich te verdiepen in de theoretische fysica, werd hem dat door Ehrenfest afgeraden, omdat die onvoldoende raakvlakken zag tussen hun snelheid en manier van werken. Dus werd Breit door Ehrenfest voor verdere vorming naar Wolfgang Pauli in Zwitserland gestuurd.⁷⁴

⁷¹ Ehrenfest aan M. Born, 21 januari 1928, APE ESC 1, sectie 10; Ehrenfest aan G.E. Uhlenbeck en S.A. Goudsmit, 11 april 1928, APE ESC 10, sectie 2.

⁷² Ehrenfest aan M. Born, 17 februari 1928, APE ESC 1, sectie 10; Casimir, *Haphazard reality* (1983) 78-79. Elsasser vertelt zelf een iets ander verhaal over zijn vertrek. Zie: Elsasser, *Memoirs of a physicist* (1978) 82-92. Het betreft hier echter een vijftig jaar oude herinnering. Zowel uit de correspondentie van Ehrenfest als die van Born blijkt dat Elsasser in Göttingen door Born in opdracht van Ehrenfest werd opgehouden.

⁷³ Casimir, *Haphazard reality* (1983) 82.

⁷⁴ G. Breit aan Ehrenfest, 21 mei 1928; Ehrenfest aan G. Breit, 1 juni 1928, APE ESC 2, sectie 6.



Paul Ehrenfest achter zijn schrijfmachine, ca. 1933.

Archief T.P. van Aardenne, doos 5, NHA; Archief P. Ehrenfest jr, NHA

Met een andere jonge bezoeker, de Amerikaanse fysicus Robert Oppenheimer, kon Ehrenfest het beter vinden dan met Elsasser. Half oktober 1928 kwam Oppenheimer op uitnodiging naar Leiden. Uhlenbeck en andere studenten liepen weg met 'Oppie', zoals Oppenheimer al snel genoemd werd. Ook Ehrenfest was heel geduldig met hem.⁷⁵ Hij was een 'zeldzaam lieve en fijne kerel' die voortdurend 'witzige' ideeën had en de discussies steeds een interessante wending gaf. Oppenheimer had echter een meer formalistische benadering van de quantumtheorie, die niet goed samenging met Ehrenfests nadruk op de

⁷⁵ Pais, *J. Robert Oppenheimer* (2006) 15-17.

fundamentele kanten van de fysica. Ehrenfest wist al te goed dat dit een persoonlijk manco was. Hij mocht Oppenheimer persoonlijk erg graag. Maar wanneer het op wetenschappelijk gebied niet boterde was dat voor hem een bron van irritatie. Zijn toenemende depressieve toestand versterkte dit alleen maar. Vandaar dat hij meende dat hij de ontwikkeling van Oppenheimer meer stoorde dan stimuleerde, wat hem erg speet. In februari 1929 stuurde hij ook Oppenheimer voor verdere vorming door naar Pauli.⁷⁶ Oppenheimer bewonderde Ehrenfest en leerde veel van hem, maar herinnerde zich dat er ten tijde van zijn bezoek niet veel leven was in de Leidse fysica. Ehrenfests depressie maakte hem stil en teruggetrokken, wat bepaald geen basis bood voor boeiende wetenschappelijke activiteiten.⁷⁷ In deze zelfde periode van 1929 dook de onfortuinlijke Gamow op bij Ehrenfest. Ehrenfest zag zelf ook in dat Gamow daar niets beter van was geworden.⁷⁸

Het Lorentzfonds bleef evenwel colloquiumbezoekers aantrekken: in 1930 kwamen Joffe, Kramers en Pauli, in 1931 Bauer, Tamm en Bohr. In 1931 werden de Russische theoretisch fysicus Fock en de Poolse experimentele fysicus Wolfke door het Fonds naar Leiden gehaald – Wolfke waarschijnlijk omdat zijn werk directe implicaties had voor de theoretische fysica. In 1932 brachten Fermi en Kronig een bezoek aan Leiden.⁷⁹ De periodes van huivering voor bezoekende fysici begonnen zich echter aaneen te schakelen tot een structurele weerstand. Ehrenfest verzuchtte in een brief aan Richard Tolman dat de vele bezoeken voor hem het karakter kregen van een ‘intellectueel Jazzlawaaï’.⁸⁰ In april 1930 schreef Ehrenfest in het geheel niet meer op bezoekers gesteld te zijn.⁸¹ Gelijkgestemde intimi als Einstein en Bohr ontving Ehrenfest des te liever. Maar Ehrenfest voelde zich geheel lamgelegd door een ononderbroken stroom onderzoekers met een heel andere onderzoeksstijl.

⁷⁶ Ehrenfest aan W. Pauli, 28 november 1928; W. Pauli aan Ehrenfest, 15 februari 1929, APE ESC 8, sectie 6.

⁷⁷ Smith en Weiner, *Robbert Oppenheimer* (1980) 121.

⁷⁸ Ehrenfest aan Bohr, 16 januari 1929, APE ESC 1, sectie 7.

⁷⁹ Ehrenfest aan A.D. Fokker, 3 juli 1931; A.D. Fokker aan Ehrenfest, 3 juli 1931, APE ESC 4, sectie 5; P. Zeeman aan Ehrenfest, 19 augustus 1931, Ehrenfest aan P. Zeeman, APE ESC 10, sectie 10; Ehrenfest aan A.D. Fokker, 21 april 1932, APE ESC 4, sectie 5; Zie voor Wolfke: Van Delft, *Heike Kamerlingh Onnes* (2005) 515, 534, 547, 554.

⁸⁰ Ehrenfest aan R. Tolman, 6 januari 1929, APE ESC 10, sectie 2.

⁸¹ Ehrenfest aan vrouw, kinderen en broers, 16 april 1930, APE EPC 1, sectie 7.

Ook Ehrenfests inzet om binnen- én buitenlandse studenten te helpen aan een beurs raakte in het slop. In 1926 bijvoorbeeld beijverde hij zich nog om met hulp van Landé, Back en Bohr en samen met Zeeman bij Towbridge in Parijs een Rockefeller stipendium aan te vragen voor Goudsmit.⁸² Maar in 1931 was zijn enthousiasme over het aanvragen van beurzen bij de Rockefeller Foundation danig bekoeld; volgens Ehrenfest zelf vanwege de grote bureaucratistische rompslomp die het met zich meebracht.⁸³

Vol verwachting bleven jonge onderzoekers Ehrenfest aanschrijven. In december 1931 schreef Peierls dat hij wilde komen in de zomer van 1933, wat door Ehrenfest werd afgeraden.⁸⁴ Met als gevolg dat Peierls vanuit Rome slechts een korte stop in Leiden maakte, en daarna in Cambridge ging werken. Wanneer Ehrenfest een eventueel bezoek wel zag zitten, speelde zijn vermeende incompetentie op het gebied van de nieuwste ontwikkelingen hem parten. Toen Benjamin Leibowitz in 1932 vroeg om een half jaar naar Leiden te kunnen komen, deelde Ehrenfest hem mee dat hij hem alleen kon helpen bij het bestuderen van wiskundige en fysische leerboeken, en zelfs daarbij zou Casimir de kar moeten trekken. Bij het bestuderen van de nieuwste wetenschappelijke literatuur werd dat moeilijker en zou dat alleen mogelijk zijn als Casimir en Ehrenfest het werk al voor eigen doeleinden hadden doorploegd. Ehrenfest wilde Leibowitz wel met alle genoegen adviseren naar welke andere universiteit hij zou kunnen gaan.⁸⁵

Ehrenfests naaste collega Fokker zag met lede ogen aan hoe door Ehrenfests optreden de Leidse theoretische fysica meer en meer in een internationaal isolement geraakte. Toen Ehrenfest wel een constructieve internationale stap nam, was dat een nogal vreemde. Hij stelde voor de immer kwakkelende student Krans met een beurs naar Rome te sturen. Zowel Ehrenfest als Fokker waren curator van het Lorentzfonds waaruit de beurs zou moeten worden betaald. Fokker zag echter niets in het plan Krans geld te geven om elders zijn voortslepende dissertatie af te maken. Hij gebruikte het Lorentzfonds liever om jonge krachten van buiten te

⁸² Ehrenfest aan P. Zeeman, 21 maart 1926, APE ESC 10, sectie 9.

⁸³ R. Peierls aan Ehrenfest, 14 december 1931; Ehrenfest aan R. Peierls, 23 december 1931, APE ESC 8, sectie 7.

⁸⁴ R. Peierls aan Ehrenfest, 14 december 1931; Ehrenfest aan R. Peierls, 23 december 1931, APE ESC 8, sectie 7.

⁸⁵ Ehrenfest aan B. Leibowitz, 24 maart 1932, APE ESC 7, sectie 3.

laten komen.⁸⁶ Er was dringend behoefte aan jong bloed. Ook Ehrenfests vrienden zagen de aftakeling van Ehrenfest en die van de Leidse fysica. Einstein stuurde in de zomer van 1932 een brandbrief naar het curatorium van de Leidse universiteit. Hierin pleitte hij tevergeefs voor een eventuele tijdelijke aanstelling van een tweede hoogleraar theoretische natuurkunde om Ehrenfest te ontlasten.⁸⁷

In de jaren dertig begon Ehrenfest het werken aan fysische problemen te haten, en de enige voldoening die hij nog kreeg vond hij in zijn onderwijs aan de studenten.⁸⁸ Echter, ook hier had het teruglopen van de internationale contacten met Ehrenfests instituut gevolgen voor het colloquium.

In sommige opzichten leek het colloquium onveranderd. Ehrenfest was nog steeds in staat om ingewikkelde zaken op een aanschouwelijke manier uit te leggen. In 1932 bezat de Leidse fysica nog altijd een aantrekkingskracht voor studenten. In Leiden, zo was het idee, gebeurden in Ehrenfests theoretisch instituut spannende dingen.⁸⁹ Keer op keer wezen studenten en jonge fysici op de kraakheldere wijze van uitleg, de vruchtbare kritiek en de diepe invloed die ze daardoor van Ehrenfest hebben ervaren. Ehrenfest zelf ervoer het onderwijs in de moderne natuurkunde echter als hoogst problematisch. Hij meende dat door zijn toenemende moeilijkheden met de quantummechanica ook het colloquium begon te haperen.

Al in 1928 constateerde Ehrenfest dat het colloquium was vastgelopen, en om het vlot te trekken vroeg hij of Kramers kwam helpen voor het herhalen van wat golfmechanica en om te praten over de nieuwste ontwikkelingen. Ehrenfest wilde genoeg leren om als leraar te kunnen functioneren; als actief publicerend fysicus voelde Ehrenfest zich al krachteloos.⁹⁰ Ehrenfest bleef vraagstukken in de quantummechanica bestuderen, om de grondgedachten achter de chaos te vinden. Iedere wens om zelf iets nieuws te kunnen vinden had hij van zich afgezet. Hij hoopte wel zowel de jonge als de rijpere fysici te kunnen dienen, zodat

⁸⁶ A.D. Fokker aan Ehrenfest, 6 maart 1931, APE ESC 4, sectie 5.

⁸⁷ Van Lunteren, 'Paul Ehrenfest' (2003).

⁸⁸ Zie bijvoorbeeld: Ehrenfest aan Mevr. U. Bradley, 29 januari 1933, APE EPC 1, sectie 4.

⁸⁹ Persoonlijke mededeling van A. Blaauw, 18 september 2008.

⁹⁰ Ehrenfest aan H.A. Kramers, 9 oktober 1928; 4 november 1928, APE ESC 6, sectie 9.

temidden van de turbulente ontwikkelingen een rustig ‘verstehen’ bewaard kon blijven.⁹¹

In 1932 schreef hij een artikel over de moeilijkheden in de quantummechanica die hij als ‘schoolmeester’ had uit te leggen aan zijn studenten. Na afloop van zijn bruisende colloquia vond Ehrenfest steeds vaker dat hij gefaald had en liet dat ook blijken. Voor de studenten was dat een schokkende gewaarwording. Dat had een negatief effect, zo benadrukte Ehrenfests student Rutgers in onverbloemde taal.

‘Als ik niet wist, wat een rare man U bent, zou ik U niet eens schrijven, maar ik maak mij werkelijk bezorgd, dat het U gisteravond na het coll[*o*quium] met deze excuseerderij ernst was. Een jammerlijke en belachelijke vertooning!: Hoe vaak heb ik nou op het colloquium al deze magnetische geschiedenis gehoord: 2x van Bremmer, 5x van v.Vleck, 1x van Gorter, geen een keer heb ik er wat van begrepen. Dacht U, dat het de anderen beter gegaan was? Nu gisteravond voor de eerste maal heb ik een stukje begrepen ... – heeft iedereen op het coll[*o*quium], die mee heeft gedaan, het ook begrepen, heerscht overal de stemming: Nou hebben we tenminste weer eens een behoorlijk coll[*o*quium] gehad, en U staat daar met een afgezakt gezicht en laat U einschüchtern. Hoe meer ik er over denk, hoe misselijker ik het vind. Maar als U zich die weg laat opdringen, dan verpest U het colloquium.’⁹²

Oort probeerde Ehrenfest in april 1933 nog een hart onder de riem te steken:

‘Ik begrijp niet waarom U zich in de laatste jaren dikwijls zoo pessimistisch hebt kunnen uiten als U in staat bent met een natuurkundig kunstwerk als uw lezing zelfs anderen zooals ik overeind en moed in te blazen.’⁹³

Ehrenfest begon ook te twijfelen aan zijn capaciteiten om het NatLab colloquium draaiende te houden. Doel van het colloquium was om, naast

⁹¹ Ehrenfest aan A.F. Joffe, 5 november 1928, APE ESC 6, sectie 1.

⁹² A.J. Rutgers aan Ehrenfest, 5 maart 1931, APE ESC 9, sectie 2.

⁹³ J.H. Oort aan Ehrenfest, 30 april 1933, APE ESC 8, sectie 2.

het scheppen van een gemeenschappelijke wetenschappelijke sfeer voor de medewerkers, het lab met de belangrijkste theoretische stromingen in contact te houden. Het was lastig om daarbij de balans te houden tussen te populaire of te moeilijke lezingen. Ehrenfest voelde zich steeds minder in staat om dit evenwicht te bewaren, door zijn verminderde werkkraft en de snelle ontwikkelingen van de fysica. Hij concludeerde dat het colloquium moest worden gereorganiseerd, het liefst zonder hemzelf als voordrager en desnoods ook zonder hem als ‘aanzwengelaar’ van de discussies. Belangrijk was dat de nieuwe generatie de voordrachten gingen verzorgen.⁹⁴

Op het laatst drong Ehrenfests twijfel zelfs door in het onderwijs. Zijn vermeende incompetentie en onvermogen om de snelle internationale ontwikkelingen te volgen maakte dat hij zich ook niet meer in staat voelde om zijn primaire taak – die van leraar – te vervullen.

Conclusie

Onder Ehrenfests bezielende leiding werd het hoge niveau van de Leidse theoretische fysica bestendig en verder uitgebouwd. Waar Lorentz soms moeite had met de acceptatie van de moderne fysica, betrok Ehrenfest het Theoretisch Instituut bij het moderne, internationale onderzoek. Leiden werd een van de leidende centra voor theoretisch-fysisch onderzoek. Ehrenfest trok jong talent aan, en veel (toekomstige) Nobelisten als Tamm, Landau, Pauli, Wigner, Born, Fermi, Schrödinger, Dirac, De Broglie, Bohr, Einstein, Planck en von Laue. De door Ehrenfest ingebrachte internationale contacten waren voor de ontwikkeling van de Leidse theoretische fysica van levensbelang.

Naast Ehrenfests eigen werkwijze en internationale ervaringen heeft ook zijn onzekerheid hier een belangrijke rol in gespeeld. Zijn eeuwige twijfel lag mede aan de basis van het aanstellen van Einstein, van veel colloquiumuitnodigingen en van zijn eigen reizen. Ook stuurde hij zijn studenten voor verdere vorming naar buitenlandse coryfeeën, omdat hij zelf weinig vertrouwen had in zijn capaciteiten om zijn studenten tot werkelijk goede fysici te vormen. Vandaar ook dat hij veelvuldig buitenlandse bezoekers liet overkomen. Daar kwam bij dat zijn eigen stijl van fysisch onderzoek het meeste baat had bij persoonlijk

⁹⁴ Ehrenfest aan W. de Groot, 10 februari 1930, APE ESC 5, sectie 2.

contact en discussies met vakgenoten. Ehrenfest stelde alles in het werk om fysici met elkaar in contact te brengen. In discussies bracht hij andere fysici verder; zelf bleef hij steeds vaker met lege handen achter, zo wordt treffend weergegeven door Burgers:

‘Ehrenfest, so to say, distributed all that which was living and active in him. Sometimes it looked ... as if he gave away everything he had found or observed, without building up a reserve, a kind of stronghold, within himself.’⁹⁵

Twijfel en depressieve periodes begonnen vanaf 1928 Ehrenfests internationale streven tegen te werken, en hij kwam in een vicieuze cirkel terecht. Hij bleef zich inzetten om zijn studenten naar het buitenland te sturen, maar raakte daardoor geïsoleerd. Er was maar weinig aanwas van studenten. De ontwikkelingen in de internationale natuurkunde gingen ongelofelijk snel, en Ehrenfest had hulp nodig deze bij te houden. Verscheurd tussen zijn eigen belangen, de belangen van Leiden en die van zijn studenten probeerde hij zijn studenten ook weer over te halen terug te komen. Hij probeerde zo van hun in het buitenland opgedane expertise te profiteren. In 1933 riep hij Casimir terug om hem bij te staan in zijn worsteling om de moderne natuurkunde te begrijpen. Casimir en Ehrenfest werkten echter in steeds toenemende mate in afzondering. Gedurende depressieve periodes was Ehrenfest buitengewoon mensenschuw. Hij meende niets te kunnen betekenen voor bezoekers en begon meer en meer buitenlandse bezoekers te weren, die overigens nog steeds in grote getale naar Leiden wilden komen. Door het grotere isolement werd het voor Ehrenfest nog moeilijker de internationale ontwikkelingen te volgen. Hierdoor zag hij zich op het laatst zelfs niet eens meer in staat om zijn inspirerende en levendige colleges en colloquia te geven. Vooral dit laatste was er mede debet aan dat hij zich op 25 september 1933 van het leven benam. Zo schreef hij in een afscheidsbrief – al een jaar eerder geschreven: ‘Die große Freude an andere weiterzugeben, was ich selber begriffen zu haben glaubte, war, wie Ihr wißt, das eigentliche Rückgrat meines Lebens.’⁹⁶

⁹⁵ J. Burgers, geciteerd in: Alkemade, ‘Biography’ (1995) xi-cix, m.n. xv.

⁹⁶ Afscheidsbrief van Ehrenfest aan N. Bohr, A. Einstein, J. Franck, G. Herglotz, A.F. Joffé, Ph. Kohnstamm, R. Tolman, 14 augustus 1932, geciteerd in: Kohnstamm, ‘Paul Ehrenfest als tolk van dezen tijd’ (1952) 425-434, m.n. 426.

Ehrenfests erfenis was een rijke schaar leerlingen, die overal nieuwe theoretische groepen stichtten. Vele anderen waren door hem geïnspireerd. De theoretische fysica in Nederland, Rusland en Amerika ontwikkelde zich krachtig, mede door zijn invloed. Hiermee was Ehrenfest een tekenend voorbeeld van de verschillende manieren waarop iemand van belang kan zijn voor de ontwikkeling van een wetenschap.

Ehrenfest speelde al enige tijd met de gedachte van zelfmoord. De betreffende brief was bestemd voor opening na Ehrenfests dood.

Conclusie

Wat kunnen we aan het eind van dit boek zeggen over Ehrenfests drijfveren, het hoe en waarom van zijn handelen? En wat kunnen we zeggen over het belang van Ehrenfest en zijn invloed op de Leidse universiteit, de fysica, zijn studenten, en de maatschappij?

Het mag duidelijk zijn dat Ehrenfest zijn hele leven heeft geworsteld met een psychische aandoening. Zijn extreme stemmingswisselingen en vooral zijn hevige depressies wijzen nadrukkelijk in die richting. Het ontbrak hem op veel terreinen aan houvast, aan een solide fundament, in zijn leven. Dit gebrek manifesteerde zich op twee manieren: enerzijds in een voortdurende zoektocht naar een vaste ondergrond, anderzijds in een al even volhardende neiging die ondergrond om te spitten. Zijn gewoonte om werkelijk alles te analyseren en ter discussie te stellen doortrok niet alleen zijn fysica, maar ook zijn persoonlijk leven. Ten gevolge hiervan voelde hij zich in geen enkel domein – de fysica, het onderwijs, de economie – echt op zijn plaats. In Leiden werd zijn behoefte aan een werkelijk thuis nooit geheel vervuld, doch werd zijn ontheemdheid langzamerhand verergerd door zijn stuklopende huwelijk. Dit weerspiegelde zich in de toenemende vervreemding die hij ervoer in de nieuwe fysica. Het is daarom onmogelijk Ehrenfests persoonlijk en wetenschappelijk leven van elkaar te scheiden.

In Ehrenfests leven treden teeds een aantal spanningsvelden op de voorgrond. Zo had hij een sterke behoefte aan erkenning, die samenhang met een gebrek aan zelfvertrouwen. Tegelijkertijd stelde hij zulke hoge eisen aan zichzelf, dat wat hij deed nooit goed genoeg kon zijn. Zijn kritische zin ging hand in hand met zijn veeleisendheid. Het hoog leggen van de lat kan zeker stimulerend werken waar het gaat om persoonlijke ontwikkeling en goede wetenschappelijke prestaties. Waar dit bij zijn leerlingen veelal goed uitpakte, werkte het in Ehrenfests geval net zo vaak verlamdend. Zijn kritische houding ten opzichte van zijn eigen werk bracht menig idee om zeep voor het tot wasdom was gekomen. Ehrenfest verwachtte onmogelijk veel van zichzelf. Hij moest en zou het niveau van de Leidse fysica vasthouden en verhogen, en

studenten op de best mogelijke manier lesgeven. Hij had er alles voor over om ze te stimuleren in hun ontwikkelingsproces, om ze op weg te helpen in hun carrière. Hij had een innerlijke drang om zichzelf nuttig te maken op velerlei manieren. Wellicht dat hij zijn vermeende falen op het ene gebied probeerde te compenseren met het uitblinken op een ander.

Deze afhankelijkheid van de goedkeuring van anderen manifesteerde zich in zijn voortdurende behoefte aan persoonlijk contact. Wetenschap en maatschappelijk engagement bevatten bij Ehrenfest een drang naar contact, en komen pas in dit contact tot wasdom. Artikelen werden meer en meer samen met studenten en assistenten geschreven, vragen ontwikkelde hij door discussies, in zijn onderwijs zocht hij het persoonlijke contact met de studenten zelfs buiten de collegebanken. Alles vanuit een soort drang om van betekenis te zijn en daarin bevestigd te worden. Ehrenfest zocht tevens naar warmte en genegenheid, en naar de zin van alles om zich heen. Maar ondanks zijn vele contacten, zijn vele bijdragen aan discussies, zijn snijdende en soms, in de ogen van zijn collega's, zeer vruchtbare kritiek bleef hij twijfelen aan al zijn kwaliteiten. Door die chronische twijfel lijkt het opvolgen van de beroemde Lorentz achteraf gezien bijna al bij voorbaat een kansloze taak te zijn geweest – zelfs Einstein huiverde bij het idee Lorentz op te moeten volgen. Voor de pathologisch onzekere Ehrenfest was het onmogelijk om ooit uit de schaduw van de grote Lorentz te treden.

Tolk van zijn tijd

De kritische Ehrenfest was extra gevoelig voor de vele veranderingen die zich op alle gebieden van de moderne wereld voordeden. Hij signaleerde veel van de problemen die wetenschappers met de moderniteit hadden, en daarmee maakte hij deze problemen zichtbaar voor ons. Hij stond midden in de heldhaftige pogingen die wetenschappers en intellectuelen in het interbellum ondernamen om de moderniteit een plaats te geven in hun wetenschap. Hij was met al zijn idiosyncratische trekjes, zoals Kohnstamm het in zijn *in memoriam* verwoordde, een 'tolk van zijn tijd'.

Zo kon de rond 1900 opgekomen moderne kunst Ehrenfest in eerste instantie weinig bekoren. Als Bachbewonderaar stond hij aanvankelijk negatief ten opzichte van moderne muziek. Toen hij voor het eerst jazz aanhoorde, leek hem dat een kakofonie van herrie,

bijzonder geschikt voor de drukke metropool met zijn bussen en auto's. Later leerde hij sommige jazz (door hem omschreven als goede jazz!) waarderen. Moderne kunst leerde hij pas waarderen toen hij het zoekende naar het nieuwe hierin herkende; daarin zat een element van een 'Sehnsucht nach dem noch Nichterreichten' en zelfs 'Sehnsucht nach WESENTLICH unerreichbaren Zielen'. Op een vergelijkbare manier werd dit verlangen volgens Ehrenfest uitgedrukt in de ontwikkelingen van de moderne fysica.¹ Wel was hij van meet af aan een bewonderaar van de strakke eenvoud van de architect Berlage en de architectuurstroming Bauhaus.² Deze architectuur paste niet alleen bij de moderne functionaliteit, maar straalde volgens Ehrenfest en anderen ook rust uit. Wat de moderne kunstenaars, de 'modernisten', trachtten te doen, was niets minder dan de verwarrende en gefragmenteerde wereld te vangen in kunst, een plaats te geven in onze cultuur. Een explosie van creativiteit was het gevolg.³

Ehrenfest en andere wetenschappers probeerden diezelfde verwarrende wereld te verwerken in hun wetenschap. Dat was moeilijk, aangezien wetenschap en techniek zelf bijdroegen aan de problemen rond de moderniteit. Daarbij viel de wetenschap ten prooi aan moderne verschijnselen als specialisatie, fragmentatie, snelle productie en concurrentie, instrumentalisme en verlies van diepgang. Net als de modernisten zochten wetenschappers als Ehrenfest naarstig naar nieuwe grondslagen voor moderne elementen in de cultuur. Daarbij braken de wetenschappers met een aantal traditionele vormen, maar bleven op andere fronten halsstarrig vasthouden aan de traditie en vertrouwde manier van wetenschapsbeoefening. Wetenschappelijk onderwijs moest enerzijds de goede aspecten behouden, anderzijds drastisch veranderen om draagvlak te creëren en de maatschappij beter te kunnen dienen. In de wetenschapspraktijk zelf trachtte men vast te houden aan de vertrouwde stijl. Anderzijds braken fysici radicaal met klassieke opvattingen als causaliteit en absolute gelijktijdigheid. Een aantal fysici schoof maar wat graag deze concepten opzij om ruimte te maken voor levensfilosofische ideeën; kortom, voor de meer menselijke kanten van wetenschap.⁴ Wetenschappers als Ehrenfest waren weliswaar

¹ P. Ehrenfest to P.A. Levene, 19 May 1932, APE ESC 7, section 3.

² Ehrenfest aan Arthur Ehrenfest, 28 augustus 1928, APE EPC 1, sectie 6.

³ Baneke, *Synthetisch denken* (2008) 26-27.

⁴ Onder andere de fysici Kohnstamm, Fokker, en Van Danzig. Zie hiervoor: Klomp, *De relativiteitstheorie in Nederland* (1997), Hollestelle, *Beperkte spontaniteit*

optimistisch over de kracht en mogelijkheden van technologie, technologisering, rationalisering en zelfs technocratie; anderzijds konden dezelfde enthousiastelingen zich pessimistisch opstellen en waarschuwen voor de ontmenselijking die de technologisering en mathematisering van de wereld ten gevolge had. Zelfs de eerst zo creatieve, op inzicht gerichte theoretische fysica begon meer en meer op 'lopende band fysica' te lijken, in elkaar gesleuteld door mensen die meer weg hadden van wiskundige machines dan van fysici. Ehrenfest, en anderen met hem, herkenden in de opkomende nieuwe natuurkundestijl een gevaar; een teken van degeneratie binnen de wetenschap. De moderne wetenschap met al haar zegeningen herbergde volgens Ehrenfest ook gevaren voor de mens. Hij las Ludwig Klages, Theodor Lessing en Oswald Spengler, die schreven over 'Die Zerstörung der Lebensfähigkeit durch den Geist'.⁵ Tegenover Nordau's geloof in rationaliteit en vooruitgang plaatsten zij de vijandigheid van de rede ten opzichte van het leven.

Ehrenfest lijkt een hunkering te hebben gehad naar een geloof; wetenschap kwam het meest bij een persoonlijke religie in de buurt. Kohnstamm wees op de zoekende kanten van Ehrenfest, en ook Clara Asscher-Pinkhof, een joodse schrijfster die Ehrenfest in zijn laatste levensdagen tegenkwam in de verlatenheid van een waddeneiland, wijst naar een levensbeschouwelijk verlangen.⁶ Ehrenfest ontbeerde een kritiekloos geloof in iets; alles werd ter discussie gesteld en daarmee kapot geredeneerd, omdat hij overal wel een fout in kon ontdekken. Dat gold voor de wetenschap, en ook voor een ideologie of een levensbeschouwing. Desondanks kunnen we Ehrenfest een Tolstoaan noemen. Hij hoopte op de verbeterbaarheid van de wereld waarin hij leefde. Dit Tolstoaanse gedachtegoed, gecombineerd met technocratie en internationalisme, heeft onmiskenbare kenmerken van een utopie.

Ook in Ehrenfests utopische gedachtegoed zien we een duidelijke tweeslachtigheid. Zijn vooruitgangsgeloof, gekoppeld aan de verbinding van wetenschap, techniek en industrie, was allerminst onbegrensd of ondubbelzinnig. Zijn gevoel van onbehagen met de moderne cultuur en maatschappij was groot, hij ervoer een zekere 'unheimlichkeit' ten

(2004), De Jong en Van Lunteren, 'Fokkers "greep in de verte"' (2003), Alberts, *Twee geesten van de wiskunde* (2000).

⁵ Ehrenfest aan C.F. Rensink, 15 mei 1932, APE ESC 8, sectie 10.

⁶ C. Asscher-Pinkhof, *Danseres zonder benen* ('s-Gravenhage 1984; eerste druk 1966) 103-106.

aanzien van de moderne wereld.⁷ Ehrenfest verwees in dit opzicht naar het boek van Henry Adams, dat een indruk geeft van de manier waarop wetenschap het geloof meer en meer ging vervangen; in het boek raakt Adams dermate in extase bij het zien van een gigantische, doordringend zoemende dynamo, dat de eerbied en ontroering van een gelovige bij de aanbedding van een Mariabeeld daarbij verbleken.⁸ Daarmee raken we aan Ehrenfests wetenschapsbeeld als vervangende religie. Hij geloofde zeer sterk in de maatschappelijke mogelijkheden van wetenschap en techniek en was een krachtig voorstander van industrialisatie, zoals hij die zich in Rusland zag voltrekken.

Ehrenfest als wegwijzer

Lange tijd kon Ehrenfest zich tot de top binnen de internationale fysica rekenen. Zijn eigen onderwaardering maakte echter dat hij zichzelf op het terrein van het onderzoek niet goed genoeg achtte. Hij richtte zich daarom ook op andere gebieden, waarbij zijn tomeloze inzet onderdeel vormde van een vertwijfeld zoeken naar een levensdoel. De twijfel over de diverse door hem aangemeten rollen stak altijd weer de kop op, maar dat laat onverlet dat hij zich in veel van die rollen sterk heeft doen gelden. Sterker nog, die twijfel lijkt hem juist te hebben aangezet tot een koortsachtige activiteit op velerlei gebied.

Ehrenfest heeft zich zeker voor de Russische fysica met hart en ziel ingezet. In 1907 introduceerde hij de moderne theoretische fysica in Rusland. Zijn colloquium vormde de start van een nieuw tijdperk voor de natuurkunde in Rusland. Na de Eerste Wereldoorlog hielp Ehrenfest mee om de fysica aldaar weer in het zadel te helpen. Tot aan zijn dood zou hij zich tot het uiterste inspannen voor de bevordering van de Russische natuurkunde. Ehrenfest hield zijn Russische collega's op de hoogte van internationale ontwikkelingen. Jonge Russische fysici werden naar Leiden gehaald en door hem met beursaanvragen ondersteund om naar Duitsland, Denemarken of de VS te reizen. Russische fysici erkenden de grote invloed die Ehrenfest had op de ontwikkeling van de Russische wetenschap; onder andere op de ontwikkeling van het nieuwe

⁷ Baneke, *Synthetisch denken* (2008) 29.

⁸ Ehrenfest aan Goudsmit, 9 februari 1930, APE ESC 5, sectie 1; Adams, *The education of Henry Adams* (1907).

instituut te Charkof. Dit soort instituten werden opgericht in de jaren 1920 en 1930 als onderdeel van de ontwikkeling van de Russische wetenschap en industrie, die zich in een razend tempo voltrok. Zoals al gezegd was Ehrenfest zeer geïnteresseerd in het Sovjetexperiment, dat voor de rest van de wereld een voorbeeld kon vormen hoe wetenschap, techniek, industrie en maatschappij samen konden komen.

Ook de Verenigde Staten droeg hij een warm hart toe. Daar waren wetenschap en maatschappij tevens innig met elkaar verweven, doch wetenschap stond er al op een hoog peil en de moderne Amerikaanse industrie was internationaal toonaangevend. De moderne theoretische fysica stond er echter nog in de kinderschoenen. Ook hier hielp Ehrenfest zeer actief mee om de fysica op een hoger plan te tillen. Jonge, veelbelovende Amerikaanse fysici werden door Ehrenfest naar Leiden gehaald en door beursaanvragen of door één van de zeer vele internationale contacten van Ehrenfest over de hele wereld gestuurd.

Gesterkt door zijn ervaringen in Rusland en de VS achtte Ehrenfest het niet alleen zijn persoonlijke missie, maar vond hij het ook de taak van de universiteiten om wetenschap en techniek ten volste in dienst te stellen van de maatschappij. Daarvoor spande Ehrenfest zich succesvol in om een begin te maken met het overbruggen van de kloof tussen universiteit en industrie in Nederland. Hij schrok er niet voor terug industriële wetenschap binnen de universiteiten te halen, door middel van de instelling van een buitengewone leerstoel voor de directeur van het Philips NatLab. Zijn redenen daarvoor waren voor een deel pragmatisch – een sterkere band met de industrie leverde banen op voor de Leidse studenten en zo konden de technisch gevormde wetenschappers de concurrentieslag aan met de wetenschappelijk gevormde technici.

Voor een ander deel was zijn motivatie idealistisch. Hij lobbyde bij universitaire bestuurders voor een hervorming van de universiteit, waardoor een sterkere band tussen universiteit en maatschappij tot stand moest komen. Hij brak een lans voor het belang van een wetenschappelijke opleiding als een onmisbare, fundamentele basis die academici in staat zou stellen de grote problemen van hun tijd op te lossen. Om dit mogelijk te maken waren twee veranderingen nodig: de universiteit moest allerlei meer toepassingsgerichte opleidingen aan zich weten te binden, en daarnaast moest binnen het gehele onderwijs de nadruk liggen op persoonlijke ontwikkeling van leerlingen en studenten. Daarbij was een balans tussen het leren denken en het ontwikkelen van

praktische vaardigheden gewenst. De balans ‘denken’ en ‘praktische toepassing’ lag volgens Ehrenfest vervat in het juiste evenwicht tussen ‘zuivere wetenschap’ en ‘praktische wetenschap’. Hij waarschuwde wel, net als veel andere wetenschappers, voor de nadelen van een eenzijdige gerichtheid op het nut; wetenschap moest ook haar traditionelere wortels binnen de zuivere wetenschap behouden.

Juist die ‘zuivere wetenschap’ lag volgens Ehrenfest aan de basis van toepassing binnen de maatschappij. Ehrenfest zag mogelijkheden om wiskunde, aangevuld met fysische analogieën, toe te passen binnen de economische wetenschap. Doel hiervan was voor hem het oplossen van de ellende bij het proletariaat. Het is tekenend dat hij oplossingen voor sociale problemen niet zocht in politieke hervormingen, maar door toepassing van de wiskunde. Zijn ideologie – onder meer geïnspireerd door H.G. Wells – was een gerationaliseerde wereldstaat, waarbij wetenschappers en wetenschappelijke bedrijfsleiders de besluiten namen. Hij sloot hiermee aan bij technocratische ideeën die zowel in Amerika als in Nederland voet aan de grond kregen na de Eerste Wereldoorlog, en die werden gepropageerd door wetenschappers als de Amerikaanse fysicus Richard Tolman, de fysicus en pedagoog Philip Kohnstamm en ingenieurs als Jan Goudriaan. Vooral onder socialistische ingenieurs en wetenschappers vond het planidee weerklank in het interbellum. Ehrenfest bracht zijn visie over op Tinbergen en Burgers en vormde hiermee mede de basis van het plandenken in Nederland, dat na de Tweede Wereldoorlog het beleid zou domineren. Een onmisbaar fundament als onderdeel van dit plandenken was de door Ehrenfest en Tinbergen in Nederland ontgonnen ‘mathematische economie’.

Ehrenfest zelf deed in de natuurkunde weinig opzienbarende ‘ontdekkingen’, en kon al evenmin prat gaan op daadwerkelijke doorbraken. Belangrijke prestaties van generatiegenoten versterkten zijn twijfels aan eigen kunnen en voedden daarmee zijn depressieve gevoelens. Wat hij er zelf ook van vond, we hebben gezien dat Ehrenfest belangrijke bijdragen heeft geleverd aan de grondslagen van de quantumfysica, de relativiteitstheorie en de statistische mechanica. Bovendien speelde Ehrenfest als ‘katalysator’ en ‘geweten’ wel degelijk een belangrijke rol in de internationale fysica.

Nog succesvoller was Ehrenfest in zijn onderwijs. Hij was een begenadigd docent met veel charisma en had daarmee een magnetische aantrekkingskracht op jonge fysici. Juist de persoonlijke stijl van

Ehrenfest vormde hier de pijler voor het succes. Het belangrijkste resultaat dat hij boekte was dat hij 'de studenten aan het praten' kreeg – iets wat Lorentz tijdens zijn professoraat vergeefs had geprobeerd. Alle activiteiten – onder meer de voor Nederland vernieuwende colloquia en de door Ehrenfest gestimuleerde dispuutcultuur bij *Christiaan Huygens* – waren erop gericht de studenten met elkaar en Ehrenfest te laten discussiëren. Argumentatie ging voor calculatie. Een ander verschil met zijn voorganger Lorentz was dat Ehrenfest zijn studenten naar het buitenland zond voor verdere vorming. Vrijwel allemaal brachten ze een tijd in Kopenhagen door, bij de door Ehrenfest verafgode Niels Bohr. Ehrenfest voerde dit beleid deels gebaseerd op zijn eigen ervaringen opgedaan tijdens zijn studietijd, en deels vanwege – wederom – zijn twijfel aan zijn eigen capaciteiten om werkelijk goede onderzoekers te kunnen vormen; 'Weshalb habe ich solche gute Studenten? Weil ich so dumm bin!'

Die studenten waren product van een zeer strenge selectie – een ander punt waarin Ehrenfest van zijn voorganger verschilde – en Ehrenfest bleef voortdurend zeer hoge eisen aan hen stellen. Voordeel van deze aanpak was dat zijn promovendi van een zeer hoog niveau waren. Het lukte Ehrenfest dankzij zijn inspanningen om een bloeiende onderzoeksschool op te zetten – iets waar zijn illustere voorganger eveneens niet in was geslaagd. Ehrenfests studenten werden vrijwel allemaal hoogleraar in binnen- of buitenland. Zij leverden belangrijke bijdragen aan de ontwikkeling van de quantumtheorie – denk maar aan de spin van het elektron – in tegenstelling tot veel van Lorentz' promovendi, die voor het merendeel in de vergetelheid verdwenen als HBS-leraren. Mede debet aan het succes van Ehrenfests onderzoeksschool was het groeiende belang van het onderzoek; in de tijd van Lorentz was het leraarschap aan een HBS de meest voorkomende carrièrekeuze voor afgestudeerde en gepromoveerde studenten in de natuurkunde; er waren simpelweg weinig banen in het onderzoek. In de tijd van Ehrenfest ontstonden er meer banen in het universitaire (en het industriële) onderzoek, in binnen- en buitenland kwamen er meer carrièremogelijkheden binnen universiteiten. Ehrenfest zorgde ervoor dat de studenten al tijdens de kandidaatsfase enthousiast werden gemaakt voor de theoretische fysica, en dat ze tijdens de doctoraalfase meteen in aanraking werden gebracht met het meest recente, moderne onderzoek. Ehrenfest nam veel van zijn onderwijsopvattingen mee vanuit het buitenland, en gaf daar zijn eigen persoonlijke draai aan. Met

Ehrenfest als charismatisch middelpunt werd Leiden één van de leidende centra voor de theoretische fysica in het interbellum.

Het moge duidelijk zijn dat Ehrenfest op vele gebieden zijn invloed heeft doen gelden. Zodanig zelfs, dat – zoals zijn student Burgers het verwoordde – hij alles van zichzelf weggaf aan anderen, en aan het eind zelf met lege handen achterbleef. De ironie is dat hij hierdoor in eerste instantie veel minder zichtbaar is dan bijvoorbeeld zijn veel bekendere vrienden Bohr of Einstein, die eveneens grote invloed hebben gehad. Hun bekendheid danken zij vooral aan enkele grote ontdekkingen op het gebied van de fysica. Ehrenfests invloed ligt niet binnen het domein van de grote natuurkundige doorbraken. Zijn beste vondst, het adiabatische principe, heeft binnen het wordingsproces van wat de quantummechanica zou worden een substantiële rol gespeeld, doch werd hierna overbodig en raakte in de vergetelheid. Nee, Ehrenfests rol binnen de natuurkunde is niet zo groot als die van zijn vrienden geweest. Maar vooral zijn bijdragen in zijn rol als docent en kennisbemiddelaar waren in zijn tijd beroemd. Bohr en Einstein erkenden overigens in deze zin Ehrenfests grote rol binnen de fysica, en die spreekt ook uit de getuigenissen die vervat liggen in een paar duizend brieven, en in de getuigenissen van zijn vrienden, collega's en leerlingen. En niet alleen binnen de fysica deed hij zijn invloed gelden. De universitaire natuurkundedidactiek en het onderwijs werden mede door hem hervormd, de ontwikkeling van wat later de econometrie zou worden was niet mogelijk zonder zijn inzet, en door zijn contacten en ijver werd de band tussen universiteit en industrie aangehaald. Hij bood hulp aan Joodse wetenschappers, en kende een tomeloze inzet voor de ontwikkeling van de Amerikaanse en vooral de Russische fysica. Kortom, waar Ehrenfest mee in contact kwam, daar deed hij zijn invloed gelden. Vrijwel iedereen die Ehrenfest ontmoette of met hem correspondeerde ervoer zijn invloed. Ehrenfest heeft in zijn leven wel degelijk veel bereikt, maar het meest tragische is dat iedereen dat zag, behalve hijzelf.

Summary

Paul Ehrenfest (1880-1933) was a renowned Austrian-Dutch-Jewish physicist, who lived and worked in Leiden from 1912 until his death in 1933. During twenty-one years, he reshaped the field of theoretical physics in Leiden in particular and Dutch physics in general. He succeeded the famous Hendrik Antoon Lorentz, winner of the Nobel Prize of physics and the most respected physicist of his days. Lorentz personally nominated Ehrenfest as his successor. Ehrenfests coming to Leiden marked the beginning of a new and dynamical period in Dutch physics.

To fully comprehend the many aspects of Ehrenfests work and his motives, we need to know something about his background. One thing is certain: Ehrenfests personal and professional lives can never be separated. Therefore, chapter 1 starts with a short biography. Ehrenfest was born in 1880 in Vienna, Austria-Hungary. Orphaned by the age of sixteen, Ehrenfest started to show depressive signs. From then on, his entire adult life would be a constant battle against manic-depression. His older brothers introduced him to science to get him through the difficult phase in his youth. In science, the relentless search for some kind of truth matched his personality and intellectual capacities. He started his studies at the University of Vienna in 1899 and soon came under the spell of Boltzmann, under whose guidance he wrote a dissertation in 1904. From then on, theoretical physics was Ehrenfests calling. Although Ehrenfest painstakingly refrained from any reference to a close personal relationship with Boltzmann his entire life, it is very likely that he felt very close to his *Doctor-Vater*. Boltzmann, like Ehrenfest, suffered from depression. When Boltzmann committed suicide, Ehrenfest wrote a very atypical *In Memoriam*. Normally, Ehrenfest had the habit to write passionately about his feelings, even to complete strangers. But in this case, to the ignorant reader, it is almost impossible to suspect that Ehrenfest knew Boltzmann at all. But one of Ehrenfests main achievements was to cast Boltzmanns legacy into a comprehensible shape for the first time. Furthermore, Ehrenfest always defended Boltzmanns views. Evidently, he empathised with Boltzmanns fate, and

maybe even saw a frightening glimpse of what his own future might look like, and decided to shut it out.

During his studies, he went to Göttingen for a longer period of time, to study with the famous mathematician Felix Klein, whose ideas also had a lasting influence on Ehrenfest. Here he also got to know his future wife, Tatiana Affanassjewa – a Russian mathematics student. After Ehrenfest finished his dissertation, the couple married. Because a marriage between a Jew and Christian was illegal, the couple decided to foreswear all religious affiliations. After that, Ehrenfest tried to obtain positions in Austria and throughout the German speaking countries of Europe. Two things made his chances slim; he was of Jewish descent, and ‘unchurched’. The last one would prove to be decisive, because academic positions in the German academic world still demanded a religious affiliation; even the Jewish religion was better than no religion at all. Although it was strictly a formality, Ehrenfest stubbornly upheld his principles and refused time and again to declare himself religious. He would always refuse to adapt to the demands of his environment.

Because Tatiana could get a job in Russia as a mathematics teacher, the couple moved to Saint Petersburg. Ehrenfests job-hunt remained unsuccessful. That didn’t mean that the time in Russia was ill spent. Because Russian theoretical physics was out of touch with modern developments in the leading German speaking countries, Ehrenfest set up a theoretical colloquium. Once a week, his living room was filled with young Russian physicists. Ehrenfest acquainted them with the methods of modern theoretical physics, the new theory of relativity and the emerging quantum theory. In the mean time, he wrote some shrewd articles about quantum theory and relativity, and together with his wife he published a comprehensive and comprehensible overview of Boltzmanns work on statistical mechanics. Gradually, Ehrenfest became a renowned physicist. When Lorentz looked for a successor, he first tried to get Einstein – who refused – and then turned to Ehrenfest. Ehrenfest was happy to accept, and came to Leiden in 1912.

The educational work Ehrenfest started in Russia was continued in Leiden. Ehrenfests role as a teacher is discussed in chapter 2, which contains two parts. In part one we take a closer look at the new educational methods Ehrenfest introduced. Ehrenfest started a regular colloquium in his living room and set up a reading room in which students could get their hands dirty on the newest work in the field. Ehrenfest was famous for his clarity, his ability to break down a

complicated theory to its essentials and to strip it from mathematical complexities. He was a born teacher, who taught by constant discussion and critique – which was also an inseparable part of his own research. Talented students were brought into contact with the most recent developments in theoretical physics at a very early stage in their studies. He stimulated advanced students to discuss scientific questions at meetings of the student organisation *Christiaan Huygens*. For students in their first years of their studies, he created a separate organisation, called *De Leidsche Flesch*. In part two of the chapter, the results of Ehrenfests educational enterprises are analysed. Partly because of his own experiences, partly because of his own insecurity, he sent his students to other leading centres in Europe to learn from the best theoretical physicists. Combined with Ehrenfests educational skills, the strong international aspect of Ehrenfests teachings formed a major contribution to the capacities of his students. Ehrenfests students were very successful and almost all of his PhD students became university professors – a strong contrast with Lorentz' students, who for the majority became high school teachers.

Chapter 3 deals with Ehrenfests work in physics. It is shown that he did some important work concerning quantum theory, the special and general theory of relativity, and quantum statistics. In his work, he constantly tried to understand every idea to the smallest detail, and sought out the flaws in the work of others. Important contributions were his exposition of Boltzmanns work, his famed 'Ehrenfest paradox', and articles about the foundations of quantum theory and quantum statistics. Ehrenfest was welcomed by colleagues all over the world as a very useful critic to expose flaws and paradoxes in current research. His ability to make things clear during discussions gave him the title of 'human catalyst', because he stimulated clear and creative thinking with everyone he came into contact with. Not so when it came to his own work. He always felt that his research was inferior compared to work done by Lorentz, Bohr and Einstein. His biggest contribution, the adiabatic hypothesis, was concerned for some time to be one of the cornerstones of quantum theory. Unfortunately, it was scrapped when quantum mechanics began to take shape. The mathematical complexities used to scaffold the new theory eluded him, and all of Ehrenfests hopes to do some really creative work of his own vanished. At the same time, he gave away everything that was living and active in him to his students and

colleagues, when at the same time he became more and more discontent with the direction his beloved theoretical physics was taking.

Chapter 4 deals with Ehrenfest's struggles with some aspects of modern science. Like other sciences, theoretical physics during the interwar period became a more and more specialized field. Scientists in general began to object to the ongoing specialisation and fragmentation of the sciences. In society, there was a growing concern about the speed and complexity of modern developments. In all cultural domains, a call for a new synthesis arose. Likewise, a call for a new unity arose in physics. But this science was an example of the worst possible way of complication, fragmentation and loss of coherence. In the twenties, new mathematical methods had to be learned almost every week to keep up with a new generation of highly specialized theoretical physicists, who were using complicated mathematics in a way that was unfamiliar and in a sense unheard of in the older generation of physicists. Especially for Ehrenfest, who always shunned complex calculation, the emerging new style of theoretical physics showed the tell-tale signs of 'degeneration'. For Ehrenfest, who always doubted his abilities to keep up with the newest developments, the new road physics took complicated things even more. Mere abstract calculation could never replace physical insight. Important contributors to quantum mechanics, like Schrödinger and Born, agreed with Ehrenfest. They felt that the younger generation had robbed them of their world picture that they so carefully had built, and were deforming it by using an incomprehensible scratch collection of quick and dirty mathematical techniques. When Ehrenfest was frantically searching for a foothold, the speed, complexity and apparent incoherence of the developing quantum mechanics made his search ever more impossible.

Chapter 5 deals with the relation between 'pure' and 'applied science'. In the interwar period, in general, scientists had a very clear view of the use of the university in society. Most of them argued that the university was an institution where science should be done for science's sake. Universities should engage in scientific research and train students to be able to perform research independently. Direct usefulness of university science was at best secondary. Scientists spoke of 'pure science' when describing their ideal. They spoke of 'applied science' when the ultimate goal of scientific research was the solving of practical problems and usefulness to society. It was no coincidence the dichotomy 'pure' and 'applied' science arose around 1900 and became subject of

debate in academic circles during the interwar years. Industry started to be more and more interested in scientific research as a basis of improving or expanding their terrain of operation. Stimulated by a new patent law, industrial research became essential in securing novel and better ways of production. Nevertheless, Ehrenfest always considered 'pure' science necessary and the most important, most fundamental basis if anything like 'applied' science or technology could flourish. Ehrenfest, fascinated by technology since his childhood days, and always tinkering with his radio-set in the attic, increasingly turned his interests to the 'applied' kind of science. Already around 1900, Klein considered that science could contribute considerably in new technological developments and had secured strong ties with German industry. Probably Ehrenfest was influenced by Klein in his views about the role of science in industry. Ehrenfest's friends in Russia, particularly A.F. Joffe, played a large part in convincing Ehrenfest to turn his attention toward industry. Joffe was the front-man of the developing Soviet physics and technology – and an old friend from Ehrenfest's Saint Petersburg days. Joffe got Ehrenfest excited about the entanglement of Soviet physics with industry and technology. Ehrenfest often travelled back to his friends in Russia, and did a lot to make people enthusiastic about the development of new physical-technological institutes that were developed there. When travelling to the United States for the first time, Ehrenfest was struck by the fact that at the universities and high schools, everything seemed to revolve around practical skills. He was highly critical about this, because this could only mean degeneracy of 'pure' science, and without that firm basis, applications would simply bleed out. In the Netherlands, Ehrenfest's colleagues, the physicists L.S. Ornstein and A.F.J.M. Michels, and the chemists H. Kruyt and H. Backer, had similar sympathies. Ornstein and Michels nevertheless did a lot of contract research for Dutch and British companies, while still maintaining their view that at the university, only 'pure' science should be practised. Backer even believed the boundaries between 'pure' and 'applied' weren't that strict. With Ehrenfest too, the lines began to fade. Next to his famous colloquium at Leiden University, he started a colloquium for the scientific employees of the research laboratory NatLab of the Dutch electronics company Philips. From 1921 on, he gave regular lectures about the newest developments in theoretical physics. Also, because he was in contact with so many scientists, he rounded up a lot of foreign speakers for the NatLab colloquia. Ehrenfest even visited the competing

laboratories of General Electric before Anton Philips or the director of the NatLab, Gilles Holst. Because of the changing career opportunities of science graduates, Ehrenfest fortified the bond between Leiden and the NatLab by offering Holst a position as an extraordinary professor at the university. Furthermore, he tried to convince the curators of the university that it was necessary to connect new, social relevant fields with the university. The result should be a kind of symbioses between 'pure' and 'applied' science. This would mean that students learned to think properly and scientifically, before plunging into social relevant studies. The university, as well as society would benefit from this, and without the loss of the ideal of 'pure' science. According to Ehrenfest, this worked very successfully in Russia, where new physical-technological institutes were being built at a high rate to help the rapid industrialisation of that country.

Chapter 6 takes a closer look at Ehrenfests ideal of bringing new and social relevant fields in close contact with the university. He had left-wing sympathies, though his critical analyses always found weak points in every ideology. His real ideology was science, and he could only analyse social problems when they were cast in a shape that made them suitable for scientific analyses. During the First World War, Ehrenfest had gotten interested in the field of economics. His work in physics stagnated because of the lukewarm reception of his cherished adiabatic hypothesis, and he looked for other means to be of some use. So when he was struck by the sharp injustice done to the proletariat, he started to read all kinds of literature dealing with economic theory. He saw a sharp contrast between the capitalist and communist approach, and started to work on bringing them together in a synthetic theory. He perceived a clear analogy between economic processes and thermo dynamical ones, and this strengthened his believe that theoretical physics could be used to construct a new science of economics. He never published anything on economic theory, and when Bohr wrote highly of Ehrenfests adiabatic theory, physics soon got his full attention again. But Ehrenfest always stayed in touch with the economical literature and also wrote to major players in the field, like Schumpeter and Bowley. And Ehrenfest wouldn't be Ehrenfest, if he didn't share his views on the matter with his students. Among them was the gifted student Jan Tinbergen. As a socialist, Tinbergen was driven to use his abilities for the benefit of society. Ehrenfest suggested that Tinbergen should try his luck on the field of mathematical economics. He introduced Tinbergen to the works of the

major economists of those days. Then, Ehrenfest asked Tinbergen to complete his studies by writing a dissertation on theoretical physics. This served to complete Tinbergens training in 'pure' science, to complete the basis for the application of theoretical physics in economics. Also, a start was made in the appendix to apply several analogies to economics. Tinbergen started working at the CBS, the Dutch central bureau of statistics, and wrote clarifying articles about economical developments and the balance of economical equilibriums. Ehrenfest was so excited after Tinbergen finished his promising dissertation, that he started to make plans to 'filter out' other promising scientists and put them to work in mathematical economics. According to Ehrenfest, mathematically trained economists were much needed. This kind of economics wasn't taught at the Dutch universities or 'hogescholen'. Despite the well intended plans, the education of mathematical economists in Leiden never really started. Ehrenfest struggled with physics, and was too depressed and simply lacked the energy. Soon, Tinbergen was appointed lecturer at the *Rotterdamse Economische Hoogeschool*, and got the chance to realise his educational plans over there. He attracted other scientists, like the physicist Tjalling Koopmans, who later on wrote his dissertation on economics under the guidance of Ehrenfests former student, the theoretical physicist H.A. Kramers. Both Tinbergen and Koopmans would later receive the Nobel Prize in economics, and especially Tinbergens work of making economical models was crucial of making predictions about the effects of government policy. The view that social problems could be combated in a scientific way was by no means unique to Ehrenfest and Tinbergen. Intellectuals wrote a lot about 'expert leadership'. Societal problems were too complex to solve without science, and scientists and engineers pleaded that politicians should lean on their expert advices. Ehrenfest felt drawn to the views of the US based *Technical Alliance*; the physicist Lewis Tolman, a friend of Ehrenfest, was one of the prominent members of this group. Ehrenfest was also inspired by H.G. Wells' *The World of William Clissold*. Wells pleaded for the appliance of science on every aspect of human life, which would lead to a utopian world state.

This brings us to Ehrenfests virtually unlimited internationalism, which is treated in chapter 7. When the First World War erupted, Ehrenfest was shocked that other scientists were influenced by the warmongering and broke of contacts with scientists from enemy nations. After the war, he took part in a Dutch initiative to

get the German and Austrian scientists back on the international scientific stage. This proved difficult, because Germany and Austria were blackballed from the international arena by an allied institute especially created for this occasion, and weren't allowed to take part in international conferences. Ehrenfest did everything in his power to stimulate Russian physics after the war. Russian physics around 1900 already lay behind with respect to the Western European physics, and Ehrenfest had started to change that. But the war cut off Russian physicists with all foreign scientists and literature. Ehrenfest started to set things right and organised that many of his international colleagues send magazine issues and books to Russia. Also, he served as an intermediary in getting articles of Russian scientists published in foreign magazines. Ehrenfest applauded the rise of multiple decentralized physical-technological institutes in Russia. He visited Russia a lot, and helped a lot of young Russian physicists to get scholarships to Europe or the US. Some of them served as Ehrenfest assistants for some time. Ehrenfest was heralded by his Russian colleagues as someone who had brought and maintained modern theoretical physics to their country. Like Russia, theoretical physics in the United States lay behind somewhat with respect to Western Europe. After a first trip to the US, Ehrenfest made it his mission to encourage young American physicists to visit Europe and served as an intermediary between American and European physicists. When he visited America, students flocked around him, drawn in by his vivid oratory style, and his personal interest in each and every one of them. His critical style, lacking mathematical complexities and focussing on fundamentals suited the Americans very much, who in general lacked a sufficient mathematical training. Although in the late twenties and thirties this was no longer the case, and physics became infinitely more difficult for Ehrenfest, he still felt very much at home in the US, and he tried to flee his obligations at Leiden for a job there. The Crisis made it impossible; universities had a lot of goodwill, but no money to appoint Ehrenfest. But even when there had been money, it is unlikely that Ehrenfest would have accepted a job in the US. In Russia Joffe had managed to secure a job for his friend, but Ehrenfest bluntly turned it down, because he felt there were already too many young talents in Russia who knew more physics than him. His depression worsened. In 1933, his last feat would be the answering of calls for help from sudden jobless German-Jewish scientists that the mail delivered at his doorstep by the dozens. He arranged the Lorentzfonds, a

fund for the stimulus of theoretical physicists, to pay for Jewish physicists to visit Holland for lectures. In the mean time, they could look for new jobs abroad, which was a lot easier on neutral soil. Despite the hardship the Jews suffered, Ehrenfest pleaded not to hate the Germans in general. An explanation for Ehrenfest's internationalism can be found in his experiences before his coming to Leiden. He had gotten to know the international atmosphere in Göttingen and was convinced of the necessity of international contacts for fruitful research. Ehrenfest's own joblessness and his experiences in Russia made it impossible to turn a blind eye for young physicists in similar hardship. Also, it made it impossible for him to feel really at home in any country. As a Jew in Vienna, he was spit at in the streets. In Germany, Austria and Russia he never felt at home. He felt at home nowhere and everywhere at the same time. Also, there was an ideological side to Ehrenfest's internationalism. Ehrenfest agreed with H.G. Wells' critique on the nation-state and his favour for a truly internationalist world government that received advice by scientists and operated by scientific standards. With Ehrenfest, ideology and pragmatics went hand in hand. Not only did foreign scientists benefit from Ehrenfest's internationalist approach, physics in Leiden also benefited a great deal from Ehrenfest's international contacts.

How Ehrenfest's internationalism formed the basis of Leiden's flourishing as one of the international centres of theoretical physics, is presented in chapter 8. Lorentz had put Leiden on the map, but never created a flourishing research school. Ehrenfest's PhD students virtually all became successful university professors. This can be explained by Ehrenfest's brilliant teaching skills, the selection of students at a very early stage in their studies, and the ruthless discipline he demanded from them. But he also made sure they knew everything about the latest developments by means of the colloquium with its regular dosage of foreign speakers and the reading room with its international literature. Also the regular visits of physicists, young and old, contributed to an international atmosphere in Leiden. Ehrenfest, feeling insecure about his abilities to really teach students something beyond the graduate level, always sent his pupils to other leading centres of theoretical physics, especially to Copenhagen. Also, his own experiences as a student in Göttingen had shaped his belief of the necessity of working a period in a foreign country. Sending away his students created a problem. Ehrenfest always needed a gifted student to discuss the latest developments with. This educated the student, and helped Ehrenfest to

get his own thoughts into shape and also to get his arms around the latest developments. In the late twenties and early thirties, just when theoretical physics became increasingly complicated and was becoming more and more like a complex mathematical machine, most of his students were abroad. For Ehrenfest, this was a disaster. There were no students to help him or talk him out of his misery, and Lorentz – who always managed to give the doubting Ehrenfest some comfort – had died in 1928. He started to try and persuade several students to come back to Leiden for help. When there were some students around, his internationalism soon got the upper hand again and he enthusiastically send his pupils to Copenhagen, Göttingen, or Zürich. Ever since he was appointed in Leiden, he had made attempts to strengthen theoretical physics. He tried to get Einstein or Debye appointed as a second professor of theoretical physics, to consolidate the level of theoretical physics in Leiden – he was by no means fit to keep it up himself, as he wrote to Lorentz in 1919. He pushed Lorentz to appoint A.D. Fokker – former assistant of Einstein – as an extraordinary professor. He made sure the Dutch mathematician Van der Waerden was appointed in Groningen, and when it succeeded he immediately visited Van der Waerden to get his help in understanding the complicated group theory. Van der Waerden left soon for the more challenging Leipzig, Fokker couldn't follow the new developments in quantum mechanics, and Ehrenfests students were professors in the Netherlands or abroad, or were studying there. Ehrenfest became more and more isolated and his deepening depression made this worse. He became unsociable. Students from the US, Russia and Germany kept writing him letters asking if they could visit the Leiden theoretical institute to work with Ehrenfest and learn from him, but Ehrenfest began refusing visitors. In the end, he even doubted that he knew enough physics to teach beginning students and he felt like his teaching abilities were leaving him – a fear that also had plagued his teacher Boltzmann. Not being able to perform the task that had been, according to Ehrenfest 'the true backbone of my life', he decided to commit suicide. He shot himself and his mentally handicapped son Wassily in the institute where Wassily lived, to relieve his family from the burden of taking care of his son. The situation in Germany, his money troubles – the institute where Wassily lived in Jena and later on in Amsterdam was very expensive –, his belief that he was a failure as Lorentz' successor, his marriage that was falling apart; all factors contributed to this tragic event. The real tragedy was that Ehrenfest was

loved by many and everybody around him could see the importance of Ehrenfests achievements on all the domains discussed in this book. Everybody, but Ehrenfest himself.

Literatuurlijst

The greatest part of a writer's time is spent in reading, in order to write; a man will turn over half a library to make one book.

Samuel Johnson

Afkortingen

AHQP x	Archive for the History of Quantum Physics, microfilm nr. x
AIP	American Institute of Physics
APE	Archief Paul Ehrenfest
BA	Burgers Archief
CSP	Collected Scientific Papers
EP x, y	Einstein Papers Volume x, document number y (zie literatuurlijst)
EPC	Ehrenfest Personal Correspondence
ESC	Ehrenfest Scientific Correspondence
M&R x.y	J. Mehra, en H. Rechenberg, <i>The Historical Development of Quantum Theory, Volume x.y</i> (zie literatuurlijst)
NBL	Niels Bohr Library, AIP.

Archieven

Archief Paul Ehrenfest, Museum Boerhaave, Leiden.

Archive for the History of Quantum Physics

Boeken en overdrukkencollectie Paul Ehrenfest: Lorentz Center, Oort Gebouw, kamer 364.

Burgers Archief, Laboratorium voor Aero- en Hydrodynamica, TU Delft

Burgers Archive, University of Maryland, McKeldin Library, Historical Manuscripts and Archives Department

Dispuut Christiaan Huygens, Universiteit Leiden, Gorlaeuslab, kamer LCP 24.

Historisch Documentatiecentrum voor het Nederlands Protestantisme,
Archief Geschiedenis van de Natuurkunde en Sterrenkunde aan
de VU, collectienummer 532, doos 5, inv. nr. 28: werkstuk over
en interview met G.J. Sizoo, 1987.

Nederlandse Natuurkundige Vereniging

Philips Company Archives, Eindhoven.

Rijksarchief Noord-Holland, Lorentzarchief, toegangsnr. 364

Correspondentie met Paul Ehrenfest: inv. nr. 20

Sterrewachtarchief Leiden, archief Willem de Sitter,

inv.no. 15 (in doos 31 volgens oude inventaris)

inv.no. 111

Tinbergenarchief, Universiteitsbibliotheek Erasmus Universiteit
Rotterdam

Universiteitsbibliotheek Leiden

Archief van de Faculteit der Wis- en Natuurkunde (AFA FA 1
t/m 44)

Archief Curatoren

Interviews

A. Blaauw, interview met de auteur, 18 september 2008.

Oral history interview transcript G. Gamow, 25 april 1968, AIP.

Oral history interview transcript Bart Jan Bok, mei 1978, AIP.

Websites

KNAW historisch ledenbestand:

http://www.knaw.nl/cfdata/leden/historisch_ledenlist.cfm?persoon=1375

Geraadpleegd op 13 augustus 2009.

<http://www.nieuws.leidenuniv.nl/nieuw-in-leiden-econophysics.jsp>

Geraadpleegd op 11 november 2008.

www.chemischdispuutleiden.nl

Geraadpleegd op 16 februari 2009.

www.leidsebiologenclub.nl

Geraadpleegd op 16 februari 2009.

Literatuur

Titels zonder auteur staan vooraan, alfabetisch geordend naar eerste woord (zonder lidwoord).

- Biografisch Woordenboek van het Socialisme en de Arbeidersbeweging in Nederland* 8 (2001)
- Dertiende Lustrum Almanak van het Chemisch Dispuut Leiden* (1991)
- Jaarboek der Rijksuniversiteit te Leiden* (1925)
- Jaarboek der Rijksuniversiteit te Leiden* (1926)
- Jaarboek der Rijksuniversiteit te Leiden* (1927)
- Levensberichten en herdenkingen*, KNAW (Amsterdam 2000)
- Levensberichten en herdenkingen*, KNAW (Amsterdam 2001)
- ‘Scientific Events: The Scientific Situation in Germany’, *Science* 77, 2 juni 1933, 528-529.
- ‘Vorwort’, *Ergebnisse der Exakten Naturwissenschaften* 1 (Berlin 1922).
- Wie is dat?* (Den Haag 1956)
- Abraham, M., ‘Prinzipien der Dynamik des Elektrons’, *Annalen der Physik* 10 (1903) 105-179.
- Abraham, M., ‘Die Bewegungsgleichungen eines Massenteilchens in der Relativtheorie’, *Physikalische Zeitschrift* 11 (1910) 527-531.
- Adams, H., *The education of Henry Adams* (New York 1931 (eerste druk 1907; eerste (privé) uitgave 1900))
- Alkemade, F., ‘Biography’, in: F.T.M. Nieuwstadt en J.A. Steketeer (eds.), *Selected papers of J.M. Burgers* (Dordrecht etc 1995) xi-cix.
- Alberts, G., ‘On Connecting Socialism and Mathematics: Dirk Struik, Jan Burgers, and Jan Tinbergen’, *Historia Mathematica* 21 (1994) 280-305.
- Alberts, G., *Jaren van berekening. Toepassingsgerichte initiatieven in de Nederlandse wiskundebeoefening 1945-1960* (Amsterdam 1998)
- Alberts, G., ‘De opkomst van het wiskundig modelleren’, *NAW* 5 (2000) 59-67.
- Alberts, G., *Twee geesten van de wiskunde: Biografie van David van Dantzig* (Amsterdam 2000)
- Arkel, A.E. van en J.H. de Boer, *Chemische binding als electrostatisch verschijnsel* (Amsterdam 1930)
- Asscher-Pinkhof, C., *Danseres zonder benen* (’s-Gravenhage 1984; eerste druk 1966) 103-106.

- Autrum, H., 'Arnold Berliner und die „Naturwissenschaften“', *Naturwissenschaften* 75 (1988) 1-4.
- Baggen, P., *Vorming door wetenschap. Universitair onderwijs in Nederland 1815-1960* (Delft 1998)
- Baggen, P. e.a., 'Opkomst van een kennismaatschappij', in: J.W. Schot e.a. (red.), *Techniek in Nederland in de Twintigste Eeuw VII* (Zutphen 2003) 141-173.
- Baneke, D., *De Groningse eeuw van de natuurwetenschappen* (Assen 2005)
- Baneke, D., "Synthese! Geef ons synthese!" H.J. Jordan en het intellectuele debat tijdens het interbellum', *Gewina* 28 (2005) 169-185.
- Baneke, D., 'Toegepaste natuurwetenschap aan de universiteit – contradictie of noodzaak?', in: L.J. Dorsman en P.J. Knegtman (red.), *Universitaire vormingsidealen. De Nederlandse universiteiten sedert 1876* (Hilversum 2006) 29-38.
- Baneke, D., *Synthetisch denken. Natuurwetenschappers over hun rol in een moderne maatschappij, 1900-1940* (Hilversum 2008)
- Battimelli, G., M.G. Ianniello en O. Kresten (eds.), *Proceedings of the International Symposium on Ludwig Boltzmann* (Wien 1993)
- Berkel, K. van, *In het voetspoor van Stevin* (Meppel 1985)
- Berkel, K. van, 'Amerikanisering van de Nederlandse Universiteit? De chemicus H.R. Kruyt over hogeschool en maatschappij (1931)', *TGGNWT* 12 (1989) 189-225.
- Berkel, K. van, 'Wetenschap en wijsbegeerte in het werk van Jacob Clay', in: K. van Berkel, *Citaten uit het boek der natuur. Opstellen over de Nederlandse wetenschapsgeschiedenis* (Amsterdam 1998)
- Berkel, K. van, *Citaten uit het boek der natuur. Opstellen over de Nederlandse wetenschapsgeschiedenis* (Amsterdam 1998)
- Berkel, K. van (red.), *De Akademie en de Tweede Gouden Eeuw* (Amsterdam 2004)
- Berkel, K. van, *Academische illusies. De Groningse universiteit in een tijd van crisis, bezetting en herstel, 1930-1950* (Amsterdam 2005)
- [Berliner, A.], 'Zur Einführung', *Naturwissenschaften* 1 (1913)
- Bernardini, C. en L. Bonolis (eds.), *Enrico Fermi: His work and legacy*, (Bologna/Berlin Heidelberg New York 2004)
- Bernhard, C.G., E. Crawford en P. Sorbom (red.), *Science, technology, and society in the time of Alfred Nobel* (Oxford 1982)
- Bezemer, J.W., *Een geschiedenis van Rusland. Van Rurik tot Brezjnev* (Amsterdam 1988)

- Boer, J. de, e.a. (red.), *The Lesson of Quantum Theory* (Amsterdam 1986)
- Boersma, K., *Inventing Structures for Industrial Research. A history of the Philips NatLab 1914-1946* (Amsterdam 2002)
- Boersma, F.K., 'Structural ways to embed a research laboratory into the company: a comparison between Philips and General Electric 1900-1940', *History of Technology* 19 (2003) 109-126.
- Boeyink, R., "*In het centrum van het drama*". *Wetenschappelijke worstelingen van Paul Ehrenfest tussen 1916-1925*, doctoraalscriptie Universiteit Utrecht (2005)
- Bohr, N., 'Discussion with Einstein on Epistemological Problems in Atomic Physics', in: J. Kalckar (ed.), *N. Bohr. Collected Works, Vol. 7* (Amsterdam 1996) 341-381.
- Bok, J. en C. Kounelis, 'Paul Langevin (1872-1946)', in: *Europhysics News* 38 (2007) 19-21.
- Bokulich, A., 'Three Puzzles about Bohr's Correspondence Principle', voordracht gehouden op 15 juli 2008 op de conferentie *HQ2 – Second International Conference on the History of Quantum Physics*, Utrecht.
- Boltzmann, L., 'Über die Methoden der theoretischen Physik' (1892), *Populäre Schriften* (Leipzig 1925) 1-10.
- Boltzmann, L., 'Josef Stefan', in: L. Boltzmann, *Populäre Schriften* (Leipzig 1925) 94.
- Boltzmann, L., *Populäre Schriften* (Leipzig 1925)
- Born, M., 'Über die Definition des starren Körpers in der Kinematik des Relativitätsprinzips', *Physikalische Zeitschrift* 11 (1910) 233-234.
- Born, M. en W. Heisenberg, 'Über Phasenbeziehungen bei den Bohrschen Modellen von Atomen und Molekeln', *Zeitschrift für Physik* 14 (1923) 44-55.
- Born, M., W. Heisenberg, P. Jordan, 'Zur Quantenmechanik II', *Zeitschrift für Physik* 35 (1926) 557-615.
- Born, M., 'Sommerfeld als Begründer einer Schule', *Naturwissenschaften* 16 (1928) 1035-1036.
- Born, M. en P. Jordan, *Elementare Quantenmechanik* (Berlin 1930)
- Born, M., *My Life. Recollections of a Nobel Laureate* (London 1978; eerste Duitse druk 1975)
- Born, M., *The Born-Einstein Letters. Friendship, Politics and Physics in Uncertain Times* (New York 2005; eerste druk 1971)
- Bos, D. van den, *Internationalisering van de natuurkunde tussen 1900 en 1930*, doctoraalscriptie Universiteit Utrecht (2002)

- Boumans, M., *A case of limited physics transfer: Jan Tinbergen's resources for re-shaping economics*, proefschrift UvA (Amsterdam 1992)
- Boumans, M., 'Paul Ehrenfest and Jan Tinbergen: A case of limited physics transfer', in: N. de Marchi (red.), *Non-natural social science: Reflecting on the enterprise of 'More heat than light'*, *History of Political Economy* 25, Annual Supplement (Durham en London 1993) 131-156.
- Boumans, M., 'Jan Tinbergen', in: *Biografisch Woordenboek van het Socialisme en de Arbeidersbeweging in Nederland* 8 (2001) 296-301.
- Bransden, B.H. en C.J. Joachain, *Quantum Mechanics* (tweede editie; Harlow 2000)
- Brush, S.G., *Statistical Physics and the Atomic Theory of Matter. From Boyle and Newton to Landau and Onsager* (New Jersey 1983)
- Brouwer, L.E.J., 'Beweis der Invarianz der Dimensionenzahl', *Mathematische Annalen* 70 (1911) 161-165.
- Brouwer, L.E.J., 'Über den natürlichen Dimensionsbegriff', *Journal für Reine und angewante Mathematik* 142 (1913) 146-152.
- Buchwald, D.K., T. Sauer, Z. Rosenkranz, J. Illy, V.I. Holmes (red.), *The Collected Papers of Albert Einstein, Volume 10, the Berlin Years* (Princeton 2006).
- Burgers, J.M., 'Adiabatische invarianten bij mechanische systemen I', *Verslagen KAW* 25 (1917) 849-857.
- Burgers, J.M., 'Adiabatische invarianten bij mechanische systemen II', *Verslagen KAW* 25 (1917) 918-922.
- Burgers, J.M., 'Adiabatische invarianten bij mechanische systemen III', *Verslagen KAW* 25 (1917) 1055-1061.
- Burgers, J.M., *Toespraken gehouden ter gelegenheid van het afscheidscollege van prof. Dr. J.M. Burgers* (Delft 1955)
- Burgers, J.M., *Autobiographical Notes*, typescript (1962), Burgers Archief TU Delft.
- Burgers, J.M., 'After dinner speech', in: S.I. Pai, A.J. Faller *et al.* (eds.), *Dynamics of fluids and plasmas* (New York 1966) xxi-xxvi.
- Callender, C., 'Answers in search of a question: 'proofs' of the tri-dimensionality of space', in: *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 36 (2005) 113-136.
- Casimir, H.B.G., 'Introduction', in: M.J. Klein, *Paul Ehrenfest. Collected scientific papers* (Amsterdam 1959) xi-xii.
- Casimir, H.B.G., 'Ehrenfest, Paul', in: J. Charité (red.), *Biografisch woordenboek van Nederland* I (Den Haag 1975) 168-170.

- Casimir, H.B.G., 'Kramers, Hendrik Anthony', in: J. Charité (red.), *Biografisch Woordenboek van Nederland I* (Den Haag 1979) 322-323.
- Casimir, H.B.G., *Haphazard reality. Half a century of science* (New York 1983)
- Casimir, H.B.G., *Het toeval van de werkelijkheid. Een halve eeuw natuurkunde* (Amsterdam 1983)
- Casimir, R., *De plaats van het Lyceum in onze onderwijsorganisatie* (z.p. 1932)
- Casimir, R., *Het Nederlandsch Lyceum van 1909 tot 1934* (Groningen 1934)
- Casimir, R., 'Bij Prof. Ehrenfests overlijden', in: R. Casimir, *Voor school en leven. Verzamelde opstellen* (Groningen en Batavia 1949) 432-433.
- Casimir, R., *Voor school en leven. Verzamelde opstellen* (Groningen en Batavia 1949)
- Cassidy, D.C., *Uncertainty. The life and science of Werner Heisenberg* (New York 1992)
- Cattell, J. (red.), *American men of science. A biographical directory, volume I: Physical Sciences* (Lancaster, PA. 1955)
- Coats, A.W. Bob (red.), *The development of economics in Western Europe since 1945* (London 2000)
- Compton, A.H., 'A quantum theory of the scattering of X-rays by light elements', *Physical Review* 21 (1923) 483-502.
- Charité, J. (red.), *Biografisch woordenboek van Nederland I* (Den Haag 1975 & 1979)
- Charité, J. (red.), *Biografisch Woordenboek van Nederland IV* (Den Haag 1994)
- Crawford, E., T. Shinn en S. Sörlin (red.), *Denationalizing science. The contexts of international scientific practice* (Dordrecht 1993)
- Crommelin, C.A., 'Verbouwing en Uitbreiding', in: C.A. Crommelin (red.), *Het natuurkundig laboratorium der Rijksuniversiteit te Leiden in de jaren 1904-1922* (Leiden 1922) 69-77.
- Crommelin, C.A. (red.), *Het natuurkundig laboratorium der Rijksuniversiteit te Leiden in de jaren 1904-1922* (Leiden 1922)
- Dekker, J.J.H. e.a. (red.), *Pedagogisch werk in de samenleving. De ontwikkeling van professionele opvoeding in Nederland en België in de 19^{de} en 20^{de} eeuw* (Leuven en Amersfoort 1987)
- Delft, D. van, *Heike Kamerlingh Onnes. Een biografie* (Amsterdam 2005)
- Delft, D. van, 'Albert Einstein in Leiden', *Physics Today* 59 (2006) 57-62.

- Delft, D. van, 'Zero-Point Energy: The Case of the Leiden Low-Temperature Laboratory of Heike Kamerlingh Onnes', *Annals of Science* 65 (2008) 339-361.
- Delft, D. van, 'De afscheidsbrief van Paul Ehrenfest', *NTvN* 74 (2008) 18-20.
- Delft, D. van, 'Rathenau, Gerhart Wolfgang (1911-1989)', in *Biografisch Woordenboek van Nederland*, <http://www.inghist.nl/Onderzoek/Projecten/BWN/lemmata/bwn6/rathenau> [26-08-2008], geraadpleegd op: 5 februari 2009.
- Delft, D. van, *Blingbling, sleutelwaarde en het miskende instrument*, oratie Universiteit Leiden, 16 januari 2009.
- Delft, D. van, 'Koude drukte. Het laboratorium van Heike Kamerlingh Onnes als internationaal centrum van laagtemperatuuronderzoek' in: L.J. Dorsman en P.J. Knegtman (red.), *Over de grens. Internationale contacten aan Nederlandse universiteiten sedert 1876* (Hilversum 2009) 31-52.
- Dirac, P.A.M., 'The adiabatic invariance of quantum integrals', *Proceedings of the Royal Society* 107 (1925) 725-734.
- Dirac, P.A.M., 'The adiabatic hypothesis for magnetic fields', *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society* 23 (1925) 69-72.
- Dold-Samplonius, Y., 'Interview with Bartel Leendert van der Waerden', *Notices of the AMS* 44 (1997) 313-320.
- Dongen, J. van, 'Einstein's Methodology, Semivectors and the Unification of Electrons and Protons', *Archive for History of Exact Sciences* 58 (2004) 219-254.
- Dongen, J. van, 'Reactionaries and Einstein's fame: "German scientists for the preservation of pure science", relativity, and the Bad Nauheim meeting', in: *Physics in Perspective* 9 (2007) 212-230.
- Dorsman, L.J. en P.J. Knegtman (red.), *Universitaire vormingsidealen. De Nederlandse universiteiten sedert 1876* (Hilversum 2006)
- Dorsman, L.J. en P.J. Knegtman (red.), *Onderzoek in opdracht: de publieke functie van het universitaire onderzoek in Nederland sedert 1876* (Hilversum 2007)
- Dorsman, L.J. en P.J. Knegtman (red.), *Over de grens. Internationale contacten aan Nederlandse universiteiten sedert 1876* (Hilversum 2009)
- Douglas, M., *Purity and danger. An analysis of concepts of pollution and taboo* (London 1966)

- Dresden, M., *H.A. Kramers. Between Tradition and Revolution* (New York etc 1987)
- Drop, H., 'De Onderwijsraad gehoord'. *Een beschrijving van plaats, taak en wijze van functioneren van een vast college van advies en bijstand* (Den Haag 1964)
- Eckert, M. en K. Märker (red.), *Arnold Sommerfeld: Wissenschaftliche Briefwechsel I: 1892-1918* (Berlin 2000)
- Eddington, A.S., *The Internal Constitution of the Stars* (Cambridge 1926)
- Ehrenberg, R., *Sozialreformer und Unternehmer: unparteiische Betrachtungen* (Jena 1904)
- Ehrenfest, T., 'Der Dimensionsbegriff und der analytische Bau physikalischer Gleichungen', *Mathematische Annalen* 77 (1916) 259-276.
- Ehrenfest, P., 'Micro- en macrophysica', verlag door S. Goudsmit, in: A.F. Holleman e.a., *Natuurkundige voordrachten*, nieuwe reeks no. 4, Maatschappij Diligentia ('s Gravenhage 1926) 12-17.
- Ehrenfest, P., 'Grafrede', *Physica* 8 (1928) 101-104.
- Ehrenfest, P., *Golfmechanika*, bewerkt door H. Casimir (Den Haag 1932)
- Ehrenfest-Afanassjewa, T., *Relevia. Een nieuw economisch systeem, een orde, waarin ik zelf ook graag zou willen leven* (Den Haag 1946)
- Einstein, A., R.C. Tolman, B. Podolski, 'Knowledge of Past and Future in Quantum Mecha-nics', *Physical Review* 37 (1931) 780-781.
- Einstein, A., 'Zu Dr. Berliners siebzigstem Geburtstag', *Naturwissenschaften* 20 (1932) 913.
- Einstein, A., 'Nachruf Paul Ehrenfest', in: *Almanak van het Leidsche Studenten-Corps* (Leiden 1934) 94-97.
- Einstein, A., *Mijn theorie. Over de speciale en algemene relativiteitstheorie* (Utrecht 1997; Oorspronkelijke titel: Über die spezielle und allgemeine Relativitätstheorie (Braunschweig 1916))
- Eisenstaedt, J. en A.J. Kox (red.), *Einstein Studies Volume 3: Studies in the History of Gen-eral Relativity* (Boston 1992)
- Elsasser, W.M., *Memoirs of a physicist in the atomic age* (New York 1978)
- Enz, C.P., *No Time to be Brief. A Scientific Biography of Wolfgang Pauli* (Oxford 2002)
- Epstein, P.S., 'Zur Theorie des Starkeffektes', *Annalen der Physik* 50 (1916) 489-520.
- Epstein, P.S., 'Zur Quantentheorie', *Annalen der Physik* 51 (1916) 168-188.

- Essen, M. van, en M. Lunenberg (red.), *Vrouwelijke pedagogen in Nederland* (Nijkerk 1991)
- Feynman, R.P., R.B. Leighton en M. Sands, *The Feynman Lectures on Physics*, deel III (Reading, Mass. 1965)
- Fermi, E., 'Il principio delle adiabatiche ed I sistemi che non ammettono coordinate angolari', *Nuovo Cimento* 25 (1923) 171-175.
- Fermi, E., 'Alcuni teoremi di meccanica analitica importanti per la teoria dei quanti', *Nuovo Cimento* 25 (1923) 271-285.
- Fermi, E. en E. Persico, 'Il principio delle adiabatiche e la nozione di forza viva nella nuova meccanica ondulatoria', *Rendiconti Lincei* 4 (1926) 452-457.
- Fine, A., *The Shaky Game. Einstein, Realism and the Quantum Theory* (Chicago 1986)
- Flamm, D., 'Boltzmanns influence on Schrödinger', in: C.W. Kilmister (red.), *Schrödinger. Centenary celebration of a polymath* (Cambridge 1987) 4-15.
- Flexner, A., *Universities. American, English, German* (New York 1930)
- Flipse, A., '*Hier leert de natuur ons zelf den weg*'. *Een geschiedenis van natuurkunde en sterrenkunde aan de VU* (Zoetermeer 2005)
- Florin, H.B.J., *Die methoden der Heavisideschen Operatorenrechnung* (Leiden 1934)
- Fokker, A.D., 'Losse aantekeningen over ons natuurkunde-onderwijs', *Weekblad* 23 (1926-1927) 961-963.
- Fokker, A.D., 'Over te betwijfelen evidenties', in: *Het Kouter* 1 (1936) 11-23.
- Forman, P., 'Scientific internationalism and the Weimar physicists: The ideology and its manipulation after World War I', *Isis* 64 (1973) 151-180.
- Fox, J.G., 'Evidence against emission theories', *American Journal of Physics* 33 (1965) 1-17.
- French, A.P. (red.), *Einstein. A centenary volume* (London 1979)
- Frenkel, V., 'Physik und Kritik: Paul Ehrenfest', *Informationen aus Wissenschaft und Technik in der Sowjetunion* 9 (1974) 39-43.
- Frenkel, V.Ya., *Jakov Ilich Frenkel. His work, life and letters* (Basel 1996; oorspronkelijke Russische titel: *Jakov Il'ich Frenkel*, Moskva 1966)
- Frewer, M., *Das mathematische Lesezimmer der Universität Göttingen unter der Leitung von Felix Klein* (Cologne 1979)

- Gallavotti, G., 'Classical mechanics and the quantum revolution in Fermi's early works', in: C. Bernardini en L. Bonolis (eds.), *Enrico Fermi: His work and legacy*, (Bologna/Berlin Heidelberg New York 2004) 75-84.
- Gavroglu, K., *Fritz London. A scientific biography* (Cambridge 1995)
- Gerlach, W. en O. Stern, 'Das magnetische Moment des Silberatoms', *Zeitschrift für Physik* 9 (1922) 353-355.
- Gerstengarbe, S., 'Die erste Entlassungswelle von Hochschullehrern deutscher Hochschulen aufgrund des Gesetzes zur Wiederherstellung des Berufsbeamtentums vom 7.7.1933', *Berichte zur Wissenschaftsgeschichte* 17 (1994) 17-39.
- Ginkel, G. van, *Prof. Peter. J.W. Debye (1884-1966) in 1935-1945* (z.p. 2006)
- Goudsmit, S. en R. de Laer Kronig, 'Die Intensität der Zeemankomponenten', *Naturwissenschaften* 12 (1925) 90.
- Goudsmit, S.A., *Atoommodel en structuur der spectra* (Amsterdam 1927)
- Grattan-Guinness, I., 'University mathematics at the turn of the century. Unpublished recollections of W.H. Young', *Annals of Science* 28 (1972) 369-384.
- Hajek, P. e.a. (red.), *Logic, Methodology and Philosophy of Science* (London 2005)
- Halpern, P., 'Nordström, Ehrenfest, and the Role of Dimensionality in Physics', *Physics in Perspective* 6 (2004) 390-400.
- Halpern, S.M., *The Institute of International Education: A History* (New York 1969)
- Harwood, J., *Technology's Dilemma. Agricultural Colleges between Science and Practice in Germany 1860-1934* (Oxford 2005)
- Heijmans, H., 'Wetenschap en industrie. L.S. Ornsteins opvattingen over toegepaste natuurkunde', in: B. Theunissen en F. van Lunteren (red.), *Zuivere wetenschap en praktisch nut. Visies op de maatschappelijke betekenis van wetenschappelijk onderzoek rond 1900*, themanummer *Gewina* 17 (1994) 177-190.
- Heijmans, H.G., *Wetenschap tussen universiteit en industrie. De experimentele natuurkunde in Utrecht onder W.H. Julius en L.S. Ornstein 1896-1940* (Rotterdam 1994)
- Heilbron, J.L., *The dilemmas of an upright man. Max Planck as spokesman for German science* (Berkeley, California 1986)
- Hemelrijk, J., 'David van Danzig's statistical work', *Synthese* 11 (1959) 335-351.

- Hentschel, K. (red.), *Physics and national socialism. An anthology of primary sources* (Basel 1996)
- Hermann, A, K. von Meyenn en V.F. Weisskopf, *Wolfgang Pauli. Wissenschaftlicher Briefwechsel mit Bohr, Einstein, Heisenberg u.a., Band I: 1919-1929* (New York, Heidelberg, Berlin 1979).
- Heymans, G., 'Leekenvragen ten opzichte van de relativiteitstheorie', in: *De Gids* 85 (1921) 85-108.
- Hilvoorde, I. van, *Grenswachters van de pedagogiek. Demarcatie en disciplinevorming in de ontwikkeling van de Nederlandse academische pedagogiek 1900-1970* (z.p. (Baarn) 2002)
- Hoch, P., 'Migration and the generation of new scientific ideas', in: *Minerva* 23 (1985) 209-237.
- Hoch, P. en J. Platt, 'Migration and the denationalization of science', in: E. Crawford, T. Shinn, S. Sörlin (red.), *Denationalizing science. The contexts of international scientific practice* (Dordrecht 1993) 133-152.
- Holleman, A.F. e.a., *Natuurkundige voordrachten*, nieuwe reeks no. 4, Maatschappij Diligentia ('s Gravenhage 1926)
- Hollestelle, M.J., 'Paul Ehrenfests internationalisme. Bloei en verval van de Leidse theoretische fysica' in: L.J. Dorsman en P.J. Knegtman (red.), *Over de grens. Internationale contacten aan Nederlandse universiteiten sedert 1876* (Hilversum 2009) 69-87.
- Hollestelle, M.J., 'Honderd jaar Ehrenfestparadox', *NTvN* 75 (2009) 316-318.
- Hollestelle, M.J., 'The Quantum in the Work of Paul Ehrenfest', voordracht, *Second International Conference on the History of Quantum Physics* (Utrecht, 14-17 juli 2008).
- Hollestelle, M.J., 'Zuivere praktijk. Paul Ehrenfests opvattingen over toegepaste natuurkunde', in: L.J. Dorsman en P.J. Knegtman (red.), *Onderzoek in opdracht: de publieke functie van het universitaire onderzoek in Nederland sedert 1876* (Hilversum 2007) 53-65.
- Hollestelle, M.J., 'Paul Ehrenfest as a Mediator', in: M. Kokowski (ed.), *The Global and the Local: The History of Science and the Cultural Integration of Europe. Proceedings of the 2nd ICESHS (Cracow, Poland, September 6-9, 2006)* 787-792.
- Hollestelle, M.J., 'Natuurkundig buitenbeentje. Philip Kohnstamms onvrede over de wetenschapsfilosofie', *NTvN* 71 (2005) 22-25.
- Hollestelle, M.J., *Beperkte spontaniteit. Leven en werk van Philip Kohnstamm*, Masters thesis Universiteit Utrecht (2004)

- Homburg, E., *Speuren op de tast. Een historische kijk op industriële en universitaire research*, Oratie Universiteit Maastricht (Maastricht 2003)
- Hoorn, M. van, 'The Physics Laboratory of the Teyler Foundation (Haarlem) under Professor H.A. Lorentz, 1909-1928', *Bulletin of the Scientific Instrument Society* 59 (1998) 14-21.
- Hovard, D. en J. Stachel (eds.), *Einstein Studies Vol 1: Einstein and the history of general relativity* (Boston, Basel, Berlin 1989)
- Huijnen, P., 'Die Grenze des Pathologischen'. *Het leven van fysicus Paul Ehrenfest 1904-1912*, doctoraalscriptie Rijksuniversiteit Groningen (2003).
- Huijnen, P. en A.J. Kox, 'Paul Ehrenfest's Rough Road to Leiden: A Physicist's Search for a Position, 1904-1912', *Physics in Perspective* 9 (2007) 186-211.
- Idenburg, P.J., *De Leidse universiteit 1928-1946: Vernieuwing en verzet* (Den Haag 1978)
- Ignatowsky, W. von, 'Der starre Körper und das Relativitätsprinzip', *Annalen der Physik* 33 (1910) 607-630.
- Illy, J., 'Einstein teaches Lorentz, Lorentz teaches Einstein: Their collaboration in General Relativity, 1913-1920', in: *Archive for History of Exact Sciences* 39 (1989) 247-289.
- Infeld, L., *Quest. An autobiography* (eerste druk 1941; New York 1980)
- Isaacson, W., *Einstein. His life and universe* (New York 2007)
- Jaeger, G., 'The Ehrenfest Classification of Phase Transitions: Introduction and Evolution', in: *Archive for History of Exact Sciences* 53 (1998) 51-81.
- Jammer, M., *The Conceptual Development of Quantum Mechanics* (New York 1966)
- Jammer, M., *Concepts of Space. The History of Theories of Space in Physics* (Cambridge, Mass. [tweede editie] 1970)
- Jammer, M., 'The EPR Problem in its Historical Development', in: P. Lahti en P. Mittelstaedt (red.), *Symposium on the Foundations of Modern Physics. 50 years of the Einstein-Podolsky-Rosen Gedanken experiment* (Singapore 1985) 129-149.
- Joas, C., C. Lehner en J. Renn (red.), *HQ-1: Conference on the History of Quantum Physics, Max-Planck Institut für Wissenschaftsgeschichte, Preprint 350, Volume II* (2008)
- Joffe, A.F., *Begegnungen mit Physikern* (Leipzig 1967).

- Jolink, A., *Jan Tinbergen: The statistical turn in economics 1903-1955* (Rotterdam 2003)
- Jones, S., *The Quantum Ten. A Story of Passion, Tragedy, Ambition and Science* (Oxford 2008)
- Jong, K. de, *Fokker en de Formanthese. Nederlandse fysica en filosofie in cultureel perspectief*, doctoraalscriptie Universiteit Utrecht (2001)
- Jong, K. de en F. van Lunteren, 'Fokkers "greep in de verte". Nederlandse fysica en filosofie in het interbellum', in: *Gewina* 26 (2003) 1-21.
- Josephson, P.R., *Physics and politics in revolutionary Russia* (Berkeley 1991)
- Jungnickel, Ch. en R. McCormach, *Intellectual Mastery of Nature. Theoretical physics from Ohm to Einstein, Volume 2: The Now Mighty Theoretical Physics 1870-1925* (Chicago 1986)
- Kaiser, D. (red.), *Pedagogy and the Practice of Science. Historical and Contemporary Perspectives* (Cambridge, Massachusetts 2005)
- Kaiser, G. en A. Claussen (red.), *Einstein und Europa – Dimensionen moderner Forschung* (Düsseldorf 2006)
- Kalckar, J. (ed.), *N. Bohr. Collected Works, Vol. 6* (Amsterdam 1985)
- Kalckar, J. (ed.), *N. Bohr. Collected Works, Vol. 7* (Amsterdam 1996)
- Kaluza, Th., 'Zum Unitätsproblem der Physik', *Sitzungsberichte Preussische Akademie der Wissenschaften* 96 (1921) 966-972.
- Kamerlingh Onnes, H., *De betekenis van nauwkeurige metingen bij zeer lage temperaturen* (Leiden 1904)
- Kamminga, H. en G. Somsen (red.), *Persuing the unity of science: scientific practice and ideology between the Great War and the Cold War* (Aldershot, in druk)
- Kant, H., *Abram Fedorovič Ioffe, Vater der sowjetischen Physik* (Leipzig 1989)
- Kerszberg, P., *The invented universe: The Einstein-De Sitter controversy (1916-17) and the rise of relativistic cosmology* (Oxford 1989)
- Kevles, D.J., *The physicists. The history of a scientific community in modern America* (New York 1979; eerste druk 1971)
- Kilmister, C.W. (red.), *Schrödinger. Centenary celebration of a polymath* (Cambridge 1987)
- Klein, M.J., *Paul Ehrenfest. Collected scientific papers* (Amsterdam 1959)
- Klein, M.J., 'Ehrenfest's contributions to the development of quantum statistics' I, II. *Nederl. Akad. Wetensch. Proc. Ser. B* 62 (1959), 41-62.

- Klein, M.J., *Paul Ehrenfest, Vol. 1: the making of a theoretical physicist* (Amsterdam 1970)
- Klein, M.J., 'Not by discoveries alone: the centennial of Paul Ehrenfest', in: *Physica* 106A (1981) 3-14.
- Klein, M.J., 'Osservando l'America: la visita di P. Ehrenfest negli USA', in: G. Battimelli, M. De Maria, A. Rossi (red.), *La ristrutturazione delle scienze tra le due guerre mondiali, vol. 2: Dall'Europa agli USA* (Roma 1985) 9-24.
- Klein, M.J., 'Great connections come alive: Bohr, Ehrenfest and Einstein' in: J. de Boer e.a. (red.), *The Lesson of Quantum Theory* (Amsterdam 1986)
- Klein, M.J., 'Physics in the making in Leiden: Paul Ehrenfest as teacher', in: A. Sarlemijn en M.J. Sparnaay (red.), *Physics in the making. Essays on developments in 20th century physics* (Amsterdam 1989) 29-44.
- Klein, M.J., A.J. Kox, J. Renn, R. Schulmann (red.), *The Collected Papers of Albert Einstein, Volume 4; The Swiss Years: Writings, 1912-1914* (Princeton 1995).
- Klein, M.J., 'Paul Ehrenfest, Niels Bohr, and Albert Einstein: Colleagues and Friends', in: *Physics in Perspective* 12 (2010) 307-337.
- Klein, O., 'Quantentheorie und fünfdimensionale Relativitätstheorie', *Zeitschrift für Physik* 37 (1926) 895-906.
- Klein, O., 'The atomicity of electricity as a quantum theory law', *Nature* 118 (1926) 516.
- Klein, O., 'Elektrodynamik und Wellenmechanik vom Standpunkt des Korrespondenzprinzips', *Zeitschrift für Physik* 41 (1927) 407-442.
- Klomp, H.A., *De relativiteitstheorie in Nederland. Breekijzer voor democratisering in het interbellum* (Utrecht 1997)
- Knegtmans, P.J. en A.J. Kox (red.), *Tot nut en eer van de stad. Wetenschappelijk onderzoek aan de Universiteit van Amsterdam* (Amsterdam 2000)
- Knegtmans, P.J., 'Onderwijs, wetenschap en particulier initiatief aan de Universiteit van Amsterdam, 1920-1950', in: P.J. Knegtmans en A.J. Kox (red.), *Tot nut en eer van de stad. Wetenschappelijk onderzoek aan de Universiteit van Amsterdam* (Amsterdam 2000) 79-105.
- Knegtmans, P.J., 'Professor Ernst Laqueur en de grenzen van het internationalisme in de wetenschap in het interbellum', in: L.J. Dorsman en P.J. Knegtmans (red.), *Over de grens. Internationale*

- contacten aan Nederlandse universiteiten sedert 1876* (Hilversum 2009) 89-100.
- Kohnstamm, Ph., 'De Onderwijsraad', *Weekblad voor Gymnasiaal en Middelbaar Onderwijs* 15 (1919) 878-884.
- Kohnstamm, Ph., 'J.D. van der Waals', *Algemeen Handelsblad*, 11 maart 1923.
- Kohnstamm, Ph., *Schepper en schepping II. Persoonlijkheid in wording: Schets ener christelijke opvoedkunde* (Haarlem 1929)
- Kohnstamm, Ph., 'Arbeidsvreugde' (1927), in: Ph. Kohnstamm, *Individue en gemeenschap. Verzamelde sociaal-paedagogische opstellen* ('s-Gravenhage 1929) 269-275.
- Kohnstamm, Ph., *Democratie, dictatuur en opvoeding* (Groningen 1934).
- Kohnstamm, Ph., 'Onderwijs en volksvoorlichting', in: K.F. Proost, J.M. Romein (red.), *Geestelijk Nederland 1920-1940 I* (Amsterdam en Antwerpen 1948) 1-45.
- Kohnstamm, Ph., 'Paul Ehrenfest als tolk van dezen tijd', in: Ph. Kohnstamm, *Keur uit het didactisch werk* (Groningen 1952; eerste druk 1948) 425-434.
- Koopmans, T.C., *Linear regression analysis of economic time series* (Haarlem 1936)
- Korthals Altes, J.P., 'Einstein en Ehrenfest', *NTvN* 71 (2005) 159.
- Kox, A.J. en M. Chamalaun (red.), *Van Stevin tot Lorentz. Portretten van Nederlandse natuurwetenschappers* (Amsterdam 1980)
- Kox, A.J., 'Hendrik Antoon Lorentz, the Ether, and the General Theory of Relativity', *Archive for History of Exact Sciences* 38 (1988) 67-78.
- Kox, A.J., 'H.A. Lorentz's contribution to kinetic gas theory', *Annals of Science* 47 (1990) 591-606.
- Kox, A.J., 'General Relativity in the Netherlands, 1915-1920', in: J. Eisenstaedt en A.J. Kox (red.), *Einstein Studies Volume 3: Studies in the History of General Relativity* (Boston 1992) 39-56.
- Kox, A.J., 'Boltzmann's influence on H.A. Lorentz', in: G. Battimelli, M.G. Ianniello, O. Kresten (eds.), *Proceedings of the International Symposium on Ludwig Boltzmann* (Wien 1993) 95-111.
- Kox, A.J., 'Uit de hand gelopen onderzoek in opdracht: H.A. Lorentz' werk in de Zuiderzeecommissie', in: L.J. Dorsman en P.J. Knegtman, *Onderzoek in opdracht. De publieke functie van het universitaire onderzoek in Nederland sedert 1876* (Hilversum 2007) 39-52.

- Kox, A.J., 'Hendrik Antoon Lorentz en Paul Ehrenfest: twee tegenpolen in gesprek', in: F.W. Lanting en J. Temminck (red.), *Wetenschapsarchieven in het Noord-Hollands Archief* (Hilversum 2010) 41-54.
- Kragh, H., *Dirac. A scientific biography* (Cambridge 1990)
- Kragh, H., *Quantum generations. A history of physics in the twentieth century* (Princeton 1999)
- Kramers, H.A., *Natuurkunde en natuurkundigen*, oratie RUL 28-9-1934 ('s Gravenhage 1934)
- Kramers, H.A., 'De professor in en buiten de maatschappij', in: *Het Kouter* (1936) 365-369.
- Kramers, H.A., *Laudatio*, uitgesproken op 26 november 1936 bij de promotie van T.C. Koopmans. Bron: http://www.lorentz.leidenuniv.nl/ILpublications/dissertations/kramers_laudatios/koopmans.txt, geraadpleegd op 4 december 2008.
- Kramers, H.A., 'Levensbericht van Dirk Coster', *Jaarboek KNAW 1951-1952* (Amsterdam) 198-201.
- Kregel, J.A. (red.), *Recollections of Eminent Economists Vol. I* (London 1988)
- Kruuk, H., *Niko's natuur. Een biografie van Niko Tinbergen* (Amsterdam 2007)
- Kuhn, T.S., *The Structure of Scientific Revolutions* (tweede editie, Chicago 1970)
- Kuhn, T.S., *The Essential Tension* (Chicago 1977)
- Kuhn, T.S., *Black-body Theory and the Quantum Discontinuity 1894-1912* (Oxford 1978)
- Kuiper, N.H., 'In memoriam Prof. Dr. M.J. van Uven 1878-1959', in: *Statistica Neerlandica* 13 (1959) 255-258.
- Labrie, A., *Het verlangen naar zuiverheid. Een essay over Duitsland* (Maastricht 1994)
- Lahti, P. en P. Mittelstaedt (red.), *Symposium on the Foundations of Modern Physics. 50 years of the Einstein-Podolsky-Rosen Gedanken experiment* (Singapore 1985)
- Lang, H. de, 'De geestrijke Paul Ehrenfest' in: *NTvN* 71 (2005) 124-128.
- Lanting, F.W. en J. Temminck (red.), *Wetenschapsarchieven in het Noord-Hollands Archief* (Hilversum 2010)
- Leclercq, P. *De adiabatiese hypothese. Ontwikkeling en toepassing in de kwantumtheorie*, doctoraalscriptie Universiteit Utrecht (2006)
- Lewis, G.N., en R.C. Tolman, 'The principle of relativity, and non-newtonian mechanics', *Philosophical Magazine* 18 (1909) 510-523.

- Lieburg, M.J. van, *De academische prijsvragen. Een inventarisatie en annotatie van de prijsvragen, uitgeschreven door de Nederlandse universiteiten 1815-1968* (Rotterdam 2007)
- Lilje, H., *Das technische Zeitalter. Grundlinien einer christlichen Deutung* (derde druk; Berlin 1932)
- London, F., 'The λ -phenomenon of liquid helium and the Bose-Einstein degeneracy', *Nature* 141 (1938) 643-644.
- Lorentz, H.A., 'The Theory of Radiation and the Second Law of Thermodynamics', *Proceedings Amsterdam Academy* 3 (1901) 436-450.
- Lorentz, H.A., 'Boltzmann's and Wien's laws of radiation', *Proceedings Amsterdam Academy* 3 (1901) 607-620.
- Lorentz, H.A., 'On the Emission and Absorption by Metals of Rays of Heat of Great Wave-Lengths', *Proceedings Amsterdam Academy* 5 (1903), herdrukt in: H.A. Lorentz, *Collected Papers III* (Den Haag 1936) 155-176.
- Lorentz, H.A., *Het relativiteitsbeginsel. Drie voordrachten gehouden in Teylers' Stichting* (Haarlem 1913)
- Lorentz, H.A., *Collected Papers III* (Den Haag 1936)
- Loria, A., 'Einstein and education', in: A.P. French (red.), *Einstein. A centenary volume* (London 1979) 215-227.
- Lunteren, F. van, B. Theunissen en Rienk Vermij (red.), *De opmars van deskundigen. Souffleurs van de samenleving* (Amsterdam 2002)
- Lunteren, F.H. van, *Uit de ivoren toren. Oratie Vrije Universiteit* (2003)
- Lunteren, F.H. van, 'Paul Ehrenfest: de Leidse onderzoekschool van een fysicus in diaspora', ongepubliceerd artikel (2003)
- Lunteren, F.H. van, *Paul Ehrenfest and the quantum revolution*, voordracht (2000).
- Lunteren, F.H. van, *Theoretische fysica als zelfstandig specialisme*, ongepubliceerd manuscript.
- Lunteren, F. van, 'Wetenschap voor het vaderland; Van der Waals en de Afdeling Natuurkunde', in: K. van Berkel (red.), *De Akademie en de Tweede Gouden Eeuw* (Amsterdam 2004) 43-106.
- Lunteren, F.H. van, 'Wissenschaft internationalisieren: Hendrik Antoon Lorentz, Paul Ehrenfest und ihre Arbeit für die Internationale Wissenschafts-Community', in: G. Kaiser en A. Claussen (red.), *Einstein und Europa – Dimensionen moderner Forschung* (Düsseldorf 2006) 25-35.

- Lunteren, F.H. van, *Geschiedenis van de moderne natuurkunde*, dictaat Universiteit Utrecht (Utrecht 2007)
- Lunteren, F.H. van, *De glimlach van de Cheshire kat: over nut en noodzaak van wetenschapsgeschiedenis*, oratie Universiteit Leiden, 30 januari 2009.
- Maarseveen, J.G.S.J. van, P.M.M. Klep, I.H. Stamhuis, *The statistical mind in modern society: the Netherlands, 1850-1940* (Amsterdam 2008)
- Maas, A.J.P., *Atomisme en individualisme. De Amsterdamse natuurkunde tussen 1877 en 1940* (Hilversum 2001)
- Maas, A., 'Koud zout', *NTvN* 72 (2006) 264-267.
- Maat, H., *Science Cultivating Practice. A History of Agricultural Science in the Netherlands and its Colonies 1863-1986* (Dordrecht 2001)
- Marage, P. en G. Wallenborn, 'The debate between Einstein and Bohr, or how to interpret Quantum Mechanics', in: P. Marage en G. Wallenborn, *The Solvay Councils and the Birth of Modern Physics* (Basel 1999) 161-174.
- Marage, P. en G. Wallenborn, *The Solvay Councils and the Birth of Modern Physics* (Basel 1999)
- Marchi, N. de (red.), *Non-natural social science: Reflecting on the enterprise of 'More heat than light', History of Political Economy* 25, Annual Supplement (Durham en London 1993)
- Medawar, J. en D. Pyke, *Hitlers geschenk. Wetenschappers die Nazi-Duitsland ontvluchtten* (Baarn 2001; oorspronkelijke titel: *Hitlers Gift* (London 2000))
- Mehra, J., *The Solvay conferences on physics. Aspects of the development of physics since 1911* (Dordrecht 1975)
- Mehra, J. en H. Rechenberg, *The Historical Development of Quantum Theory, Volume 1.1: The Quantum Theory of Planck, Einstein, Bohr and Sommerfeld: Its Foundations and the Rise of Its Difficulties 1900-1925* (New York, Heidelberg, Berlin 1982)
- Mehra, J. en H. Rechenberg, *The Historical Development of Quantum Theory, Volume 1.2: The Quantum Theory of Planck, Einstein, Bohr and Sommerfeld: Its Foundations and the Rise of Its Difficulties 1900-1925* (New York, Heidelberg, Berlin 1982)
- Mehra, J. en H. Rechenberg, *The Historical Development of Quantum Theory, Volume 2: The Discovery of Quantum Mechanics 1925* (New York, Heidelberg, Berlin 1982)

- Mehra, J. en H. Rechenberg, *The Historical Development of Quantum Theory, Volume 3: The Formulation of Matrix Mechanics and Its Modifications 1925-1926* (New York, Heidelberg, Berlin 1982)
- Mehra, J. en H. Rechenberg, *The Historical Development of Quantum Theory, Volume 4: The Fundamental Equations of Quantum Mechanics 1925-1926 / The Reception of Quantum Mechanics 1925-1926* (New York, Heidelberg, Berlin 1982)
- Mehra, J. en H. Rechenberg, *The Historical Development of Quantum Theory, Volume 5.1: Erwin Schrödinger and the Rise of Wave Mechanics: Schrödinger in Vienna and Zürich* (New York, Heidelberg, Berlin 1987)
- Mehra, J. en H. Rechenberg, *The Historical Development of Quantum Theory, Volume 5.2: Erwin Schrödinger and the Rise of Wave Mechanics: The Creation of Wave Mechanics; Early Response and Applications* (New York, Heidelberg, Berlin 1987)
- Mehra, J. en H. Rechenberg, *The Historical Development of Quantum Theory, Volume 6.1: The Completion of Quantum Mechanics 1926-1941: The Probability Interpretation and the Statistical Transformation Theory, the Physical Interpretation, and the Empirical and Mathematical Foundations of Quantum Mechanics 1926-1932* (New York, Heidelberg, Berlin 2000)
- Mehra, J. en H. Rechenberg, *The Historical Development of Quantum Theory, Volume 6.2: The Completion of Quantum Mechanics 1926-1941: The Conceptual Completion and the Extensions of Quantum Mechanics 1932-1941/Epilogue: Aspects of the Further Development of Quantum Theory* (New York, Heidelberg, Berlin 2001)
- Miller, A.I., 'Visualization lost and regained: The genesis of the Quantum Theory in the period 1913-1927', in: J. Wechsler (red.), *On Aesthetics in Science* (Cambridge, Mass. 1978) 72-102.
- Miller, A.I., *Albert Einstein's special theory of relativity: Emergence (1905) and early interpretation (1905-1911)* (Reading, Massachusetts 1981)
- Mirowski, Ph., *More heat than light: economics as social physics; physics as nature's economics* (Cambridge 1989)
- Mirowski, Ph., 'The When, the How and the Why of mathematical expression in the history of economic analysis', *Journal of Economic Perspectives* 5 (1991) 145-157
- Molenaar, L., *De rok van het universum. Marcel Minnaert, astrofysicus 1893-1970* (Amsterdam 2003)

- Mulder, E., 'Puberteit, pedagogiek en een proefschool voor heel Nederland', *Pedagogische Verhandelingen* 8 (1985) 169-181.
- Mulder, E., *Beginsel en beroep. Pedagogiek aan de universiteit in Nederland 1900-1940*, proefschrift (z.p. (Amsterdam) 1989)
- Muller, F.A., 'The equivalence myth of quantum mechanics – part I', *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 28 (1997) 35-61.
- Muller, F.A., 'The equivalence myth of quantum mechanics – part II', *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 28 (1997) 219-247.
- Muller, F.A., 'The equivalence myth of quantum mechanics', *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 30 (1999) 543-545 (Addendum).
- Navarro, L. en E. Pérez, 'Paul Ehrenfest on the Necessity of Quanta (1911): Discontinuity, Quantization, Corpuscularity, and Adiabatic Invariance', *Archive for History of Exact Sciences* 58 (2004) 97-141.
- Navarro, L. en E. Pérez, 'Paul Ehrenfest: The Genesis of the adiabatic Hypothesis, 1911-1914', *Archive for History of Exact Sciences* 60 (2006) 209-267
- Nieuwstadt, F.T.M. en J.A. Steketee (eds.), *Selected papers of J.M. Burgers* (Dordrecht etc 1995)
- Noether, F., 'Zur Kinematik des Starren Körpers in der Relativtheorie', *Annalen der Physik* 31 (1910) 919-944.
- Norton, J.D., 'Einstein, Nordström and the early demise of scalar, Lorentz-covariant theories of gravitation', *Archive for History of Exact Sciences* 45 (1992) 17-94.
- Oosterhof, J.L., 'De opkomst van een "Vaderlandsche Natuurkunde" aan de Leidse universiteit in de tweede helft van de negentiende eeuw', in: W. Otterspeer (red.), *Een universiteit herleeft* (Leiden 1984) 103-124.
- Osterbrock, D.E., 'Herman Zanstra, Donald H. Menzel, and the Zanstra method of nebular astrophysics', *Journal for the History of Astronomy* 32 (2001) 93-108.
- Otterspeer, W. (red.), *Een universiteit herleeft* (Leiden 1984)
- Otterspeer, W. en J. Schuller tot Peursum-Meijer, *Wetenschap en wereldvrede. De Koninklijke Akademie van Wetenschappen en het herstel van de internationale wetenschap tijdens het Interbellum* (Amsterdam 1997)

- Overbeek, J.Th.G., 'Levensbericht A.J. Rutgers', in: *Levensberichten en herdenkingen*, KNAW (Amsterdam 2000) 55-60.
- Pai, S.I. en A.J. Faller e.a. (eds.), *Dynamics of fluids and plasmas* (New York 1966)
- Pais, A., *Inward bound: of matter and forces in the physical world* (Oxford 1986)
- Pais, A., *Niels Bohr's Times, in Physics, Philosophy and Polity* (Oxford 1991)
- Pais, A., *Subtle is the Lord: The science and the life of Albert Einstein* (Eerste druk 1982; Oxford 2005)
- Pais, A., *The genius of science. A portrait gallery* (Oxford 2000)
- Pais, A., *J. Robert Oppenheimer; A Life* (Oxford 2006)
- Paley, W., *Natural Theology; or, Evidences of the Existence and Attributes of the Deity* (London 1802)
- Pannekoek, A., *Herinneringen. Herinneringen aan de arbeidersbeweging. Sterrenkundige herinneringen* (Amsterdam 1982)
- Panofsky, W.K.H. en M. Phillips, *Classical Electricity and Magnetism* (Reading, Mass. 1962)
- Pauli, W., 'Einige die Quantenmechanik betreffende Erkundigungsfragen', *Zeitschrift für Physik* 80 (1933) 573-586.
- Pauli, W., *Niels Bohr and the development of physics* (London 1955) 30-31.
- Pauling, L. en E.B. Wilson, *Introduction to Quantum Mechanics* (New York 1935)
- Pérez Canals, E., *La hipótesis adiabática de Paul Ehrenfest. Historia de una transformación*, proefschrift Universitat de Barcelona (2007)
- Perovic, S., 'Why were Matrix Mechanics and Wave Mechanics considered equivalent?', *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 39 (2008) 444-461.
- Planck, M., 'Gleichförmige Rotation und Lorentz-Kontraktion', *Physikalische Zeitschrift* 11 (1910) 294.
- Plaskett, H.H., 'Herman Zanstra', *Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society* 15 (1974) 59-66.
- Plasmeijer, H.W. en E. Schoorl, 'Postwar Dutch economics. Internationalization and homogenization', in: A.W. Bob Coats (red.), *The development of economics in Western Europe since 1945* (London 2000) 67-93.
- Poincaré, H., 'L'espace et ses trois dimensions', *Revue de métaphysique et de morale* 11 (1903) 281-301, 407-429.

- Poincaré, H., 'Pourquoi l'espace a trois dimensions', *Revue de métaphysique et de morale* 20 (1912) 483-504.
- Polder, D., 'Levensbericht H.B.G. Casimir', in: *Levensberichten en herdenkingen*, KNAW (Amsterdam 2001) 13-22.
- Proost, K.F. en J.M. Romein (red.), *Geestelijk Nederland 1920-1940 I* (Amsterdam en Antwerpen 1948)
- Pyenson, L., *The young Einstein. The advent of relativity* (Bristol 1985)
- Reingold, N. en I.H. Reingold (eds.), *Science in America. A Documentary History 1900-1939* (Chicago 1981)
- Reisman, A., *Turkey's Modernization. Refugees from Nazism and Atatürk's Vision* (Washington DC 2006)
- Rispens, S.I., *Einstein in Nederland. Een intellectuele biografie.* (Amsterdam 2006)
- Röhle, S., *Willem de Sitter in Leiden. Ein Kapitel in der rezeptionsgeschichte der Relativitätstheorien*, proefschrift Johannes Gutenberg-Universität (Mainz 2007)
- Rooy, P. de, *Republiek van rivaliteiten. Nederland sinds 1813* (Amsterdam 2002)
- Romein, J., *Op het breukvlak van twee eeuwen. De westerse wereld rond 1900* (Amsterdam 1967)
- Rompuy, E. van, *Jan Tinbergen: De eerste Nobelprijswinnaar economie* (Antwerpen en Utrecht 1974)
- Rouse, J., *Knowledge and power: toward a political philosophy of science* (Ithaca 1990)
- Rupp, J.C.C., *Van oude en nieuwe universiteiten. De verdringing van Duitse door Amerikaanse invloeden op de wetenschapsbeoefening in Nederland, 1945-1995* (Den Haag 1997).
- Sarlemijn, A. en M.J. Sparnaay (red.), *Physics in the making. Essays on developments in 20th century physics* (Amsterdam 1989)
- Schabas, M., *The natural origins of economics* (Chicago 2006)
- Schiller, F., 'Kant und seine Ausleger', in: *Sämmtliche Werke I* (Stuttgart 1838) 436.
- Schneider, M.R., 'A service for the physicists? B.L. van der Waerden's early contributions to quantum mechanics', in: C. Joas, C. Lehner en J. Renn (red.), *HQ-1: Conference on the History of Quantum Physics, Max-Planck Institut für Wissenschaftsgeschichte, Preprint 350, Volume II* (2008) 327-343.
- Schoor, W. van der, 'Biologie en landbouw. F.A.F.C. Went en de Indische proefstations', in: B. Theunissen en F. van Lunteren

- (red.), *Zuivere wetenschap en praktisch nut. Visies op de maatschappelijke betekenis van wetenschappelijk onderzoek rond 1900*, themanummer *Gerwina* 17 (1994) 145-161.
- Schröder-Gudehus, B., 'Division of labour and the common good: The International Association of Academies, 1899-1914', in: C.G. Bernhard, E. Crawford en P. Sorbom (red.), *Science, technology, and society in the time of Alfred Nobel* (Oxford 1982) 3-20.
- Schulmann, R., A.J. Kox, M. Janssen en J. Illy (eds.), *The Collected Papers of Albert Einstein, Volume 8, part B; The Berlin Years: Correspondence, 1918* (Princeton 1998)
- Schweber, S., 'The empiricist temper regnant: theoretical physics in the US, 1920-1950', in: *Historical Studies in the Physical Sciences* 17 (1986) 55-98.
- Segrè, E., *Enrico Fermi; Physicist* (Chicago 1970)
- Servos, J., 'Mathematics and the physical sciences in America, 1880-1930', *Isis* 77 (1986) 611-629.
- Seth, S., 'Crisis and the construction of modern theoretical physics', *British Journal for the History of Science* 40 (2007) 25-51.
- Singer, E., *C. Philippi-Siewertsz van Reesema. Pionierster op het gebied van kinderstudies en kleuteronderwijs*, in: M. van Essen en M. Lunenberg (red.), *Vrouwelijke pedagogen in Nederland* (Nijkerk 1991) 106-116.
- Sitter, W. de, 'A proof of the constancy of the velocity of light', *Proceedings KAW* 15 (1913) 1297-1298.
- Sitter, W. de, 'On the constancy of the velocity of light', *Proceedings KAW* 16 (1913) 395-396.
- Sitter, W. de, 'Ein astronomischer Beweis für die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit', *Physikalische Zeitschrift* 14 (1913) 429.
- Sitter, W. de, 'Über die Genauigkeit, innerhalb welcher die Unabhängigkeit der Lichtgeschwindigkeit von der Bewegung der Quelle behauptet werden kann', *Physikalische Zeitschrift* 14 (1913) 1267.
- Sitter, W. de, 'On Einstein's theory of gravitation and its astronomical consequences. First paper', *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 76 (1916) 699-728.
- Sitter, W. de, 'On Einstein's theory of gravitation and its astronomical consequences. Second paper', *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 77 (1916) 155-183.

- Sitter, W. de, 'On the relativity of rotation in Einstein's theory', *Proceedings KAW* 19 (1916) 527-532.
- Sitter, W. de, 'On the relativity of inertia. Remarks concerning Einstein's latest hypothesis', *Proceedings KAW* 19 (1917) 1217-1225.
- Sitter, W. de, 'On the curvature of space', *Proceedings KAW* 20 (1917) 229-242.
- Smith, A.K. en C. Weiner (red.), *Robert Oppenheimer. Letters and recollections* (Cambridge, Massachusetts 1980)
- Snelders, H.A.M., 'De bemoeienissen van Lorentz en Einstein met de Utrechtse leerstoel voor theoretische fysica (1911-1914)', *TGGNWT* 10 (1987) 61-63.
- Snoep, P.P., *Technisch-hygiënische beschouwingen over de economie van den industrielen arbeid*, proefschrift Technische Hoogeschool Delft (Leiden 1918)
- Sombart, W., *Die Juden und das Wirtschaftsleben* (Leipzig 1911)
- Sombart, W., *Das Wirtschaftsleben im Zeitalter des Hochkapitalismus* (München und Leipzig 1927)
- Sommerfeld, A., *Atombau und Spectrallinien* (Braunschweig 1919)
- Sommerfeld, A., *Atombau und Spectrallinien* (derde editie; Braunschweig 1922)
- Somsen, G., 'Hooge School en Maatschappij. H.R. Kruyt en het ideaal van wetenschap en samenleving', in: B. Theunissen en F. van Lunteren (red.), *Zuivere wetenschap en praktisch nut. Visies op de maatschappelijke betekenis van wetenschappelijk onderzoek rond 1900*, themanummer *Gewina* 17 (1994) 162-176.
- Somsen, G., "*Wetenschappelijk onderzoek en algemeen belang*". *De chemie van H.R. Kruyt 1882-1959* (Delft 1998)
- Somsen, G., 'Waardevolle wetenschap. Bespiegelingen over natuurwetenschap, moraal en samenleving in de aanloop naar de doorbraakbeweging', in: G. Somsen (red.), *De doorbraak van de experts: wetenschap en maatschappelijke vernieuwing rond 1945*, themanummer *Gewina* 24 (2001) 207-224.
- Somsen, G. (red.), *De doorbraak van de experts: wetenschap en maatschappelijke vernieuwing rond 1945*, themanummer *Gewina* 24 (2001)
- Somsen, G., 'A History of Universalism. Conceptions of the internationality of Science from the Enlightenment to the Cold War', in: *Minerva* 46 (2008) 361-379.
- Sopka, K.R., *Quantum physics in America: The years through 1935* (z.p. 1988)

- Stachel, J., 'The rigidly rotating disk as the "missing link" in the history of general relativity', in: D. Hovard en J. Stachel (eds.), *Einstein Studies Vol 1: Einstein and the history of general relativity* (Boston, Basel, Berlin 1989) 48-62.
- Staley, R., *Einstein's generation. The origins of the relativity revolution* (Chicago en London 2008)
- Stamhuis, I.H., '*Cijfers en Aequaties*' en '*Kennis der Staatskrachten*'. *Statistiek in Nederland in de negentiende eeuw* (Amsterdam 1989)
- Stamhuis, I.H., 'Pearson's Statistics in the Netherlands and the Astronomer Kapteyn', in: *International Statistical Review* 77 (2009) 96-117.
- Störrig, H.J., *Geschiedenis van de filosofie* (Utrecht 2002; eerste druk 1959)
- Struik, D.J., *Autobiographical Notes*, typescript (1973), NBL, call number: MB 508.
- Tajic, A., *Study of a stroboscopic model of a quantum dot*, proefschrift Universiteit Leiden (2005).
- Taylor, M.L., *Investing in People Linking Nations: The First Seventy-Five Years of the Institute of International Education* (New York 1994)
- Theunissen, B. en F. van Lunteren (red.), *Zuivere wetenschap en praktisch nut. Visies op de maatschappelijke betekenis van wetenschappelijk onderzoek rond 1900*, themanummer *Gewina* 17 (1994)
- Theunissen, B. en H. Klomp, 'H.A. Lorentz' visie op wetenschap', *Gewina* 21 (1998) 1-14.
- Theunissen, B., *Diesels droom en Donders' bril. Hoe wetenschap werkt* (Amsterdam 2004)
- Theunissen, B., *De januskop van de wetenschapsgeschiedenis*, oratie Universiteit Utrecht, 13 april 2005 (Amsterdam 2006)
- Theunissen, B., 'Een mooie koe is een goede koe. Wetenschappers en practici over de Nederlandse rundveefokkerij, 1900-1950', *Studium* 1 (2008) 47-61.
- Theunissen, B., 'Breeding without Mendelism: Theory and Practice of Dairy Cattle Breeding in The Netherlands 1900-1950', *Journal of the History of Biology* 41 (2008) 637-676.
- Theunissen, B., *De Koe. Het verhaal van het Nederlandse melkvee, 1900-2000* (2010)
- Thorndike Greenspan, N., *The end of a certain world. The life and science of Max Born* (New York 2005)
- Tinbergen, J., 'Verstand of gevoel', *Kentering* 1 (1924) 24-25.

- Tinbergen, J., 'Wiskunde – grenswaarde – Marx', *Kentering* 1 (1925) 65-68.
- Tinbergen, J., *Minimumproblemen in de natuurkunde en ekonomie*, Proefschrift (Amsterdam 1929)
- Tinbergen, J., 'Het verband tussen den aardappeloogst en den prijs en den uitvoer van aardappelmeel', *De Nederlandsche Conjunctuur* 1 (1930) 18-26.
- Tinbergen, J., 'Scheepsbouw en conjunctuurverloop', *Nederlandsche Conjunctuur* 2 (1931) 24-30.
- Tinbergen, J., 'Ein Schiffbauzyklus?', *Weltwirtschaftliches Archiv* 34 (1931) 152-164.
- Tinbergen, J., 'Annual survey: Suggestions on quantitative business cycle theory', *Econometrica* 3 (1935) 241-308.
- Tinbergen, J., *Les fondements mathématiques de la stabilisation du mouvement des affaires* (Paris 1938)
- Tinbergen, 'Recollections of Professional Experiences', in: J.A. Kregel (red.), *Recollections of Eminent Economists Vol. I* (London 1988) 67-95.
- Trogemann, G., A.Y. Nitussov en W. Ernst, *Computing in Russia: the history of computer devices and information technology revealed*. (Wiesbaden 2001) lemma 'Paul Ehrenfest', 60.
- Tropp, E.A., V.Ya. Frenkel en A.D. Chernin, *Alexander A. Friedmann: The man who made the universe expand* ([oorspronkelijke Russische uitgave: 1988] Cambridge 1993)
- Uffink, J., 'Nought but Molecules in Motion', Essay Review, *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 27 (1996) 373-387.
- Uffink, J., 'Rereading Ludwig Boltzmann', in: P. Hajek e.a. (red.), *Logic, Methodology and Philosophy of Science* (London 2005) 537-555.
- Uhlenbeck, G.E., S. Goudsmit, G.H. Dieke, 'Paul Ehrenfest', *Science* 78 (1933) 377-378.
- Uhlenbeck, G.E., *Oude en nieuwe vragen der natuurkunde*, Oratie (Amsterdam 1955)
- Uhlenbeck, G.E., 'Reminiscences of Professor Paul Ehrenfest', in: *American Journal of Physics* 24 (1956) 431-433.
- Uhlenbeck, G.E., 'Some Reminiscences about Einstein's visits to Leiden', in: H. Woolf (red.), *Some Strangeness in the Proportion. A Centennial Symposium to Celebrate the Achievements of Albert Einstein* (Reading, Mass. 1980) 524-525.

- Varičak, V., 'Zum Ehrenfestschen Paradoxon', *Physikalische Zeitschrift* 12 (1911) 169-170.
- Visser, R.P.W. en C. Hakfoort (red.), *Werkplaatsen van wetenschap en techniek: Industriële en academische laboratoria in Nederland, 1860-1940* (Amsterdam 1987), themanummer van *Tijdschrift voor de Geschiedenis der Geneeskunde, Natuurwetenschappen, Wiskunde en Techniek* 9 (1987) 143-318.
- Vries, M.J. de en F.K. Boersma, *80 years of research at the Philips Natuurkundig Laboratorium 1914-1994* (Amsterdam 2005)
- Vroede, M. de, 'Onderwijs en pedagogiek. Karaktertrekken van de ontwikkeling in Nederland en België tijdens de 19^{de} en 20^{ste} eeuw', in: J.J.H. Dekker e.a. (red.), *Pedagogisch werk in de samenleving. De ontwikkeling van professionele opvoeding in Nederland en België in de 19^{de} en 20^{ste} eeuw* (Leuven en Amersfoort 1987) 115-140.
- Waals jr., J.D. van der, 'Over de ruimte', in: *Onze Eeuw* 21 (1921) 57-84.
- Waals jr., J.D. van der, *Over den wereldaether* (Haarlem 1921)
- Waals jr., J.D. van der, *De relativiteitstheorie* (Haarlem 1923)
- [Waals jr., J.D. van der], 'Stemmen uit de redactie', *De Gids* 97 (1933) 1-5.
- Wachelder, J., 'Wetenschappelijke vorming: een omstreden kwestie', in: L.C. Palm, G. Vanpaemel en F.H. van Lunteren (red.), *De toga om de wetenschap. Ontwikkelingen in het hoger onderwijs in de geneeskunde, natuurwetenschappen en techniek in België en Nederland (1850-1940)*, themanummer *Gewina* 16 (1993) 9-26.
- Warwick, A., *Masters of Theory. Cambridge and the rise of mathematical physics* (Chicago 2003)
- Warwick, A. en D. Kaiser, 'Kuhn, Foucault, and the Power of Pedagogy', in: D. Kaiser (red.), *Pedagogy and the Practice of Science. Historical and Contemporary Perspectives* (Cambridge, Massachusetts 2005) 393-409.
- Wechsler, J. (red.), *On Aesthetics in Science* (Cambridge, Mass. 1978)
- Wegener, D., *A True Proteus. A History of Energy Conservation in German Science and Culture, 1847-1914*, proefschrift Universiteit Utrecht (Utrecht 2009)
- Weisskopf, V.F., *Physics in the Twentieth Century: Selected Essays* (Cambridge, Massachusetts 1972)
- Wells, H.G., *The World of William Clissold* (London 1926)

- Weyl, H., 'Gravitation und Elektrizität', *Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften* 26 (1918) 465-480.
- Weyl, H., 'Neue Erweiterung der Relativtheorie', *Annalen der Physik* 364 (1919) 101-133.
- Wheaton, B., *Catalogue of the Paul Ehrenfest Archive at the Museum Boerhaave Leiden* (Leiden 1977)
- Wigner, E., *Gruppentheorie und ihre Anwendung auf die Quantenmechanik der Atomspektren* (Braunschweig 1931)
- Wilde, R. de, en G.J. Somsen, 'Government as scientific process in H.G. Wells' world state', te verschijnen in: Kamminga, H. en G. Somsen (red.), *Persuing the unity of science: scientific practice and ideology between the Great War and the Cold War* (Aldershot)
- Willink, B., *Burgerlijk sciëntisme en wetenschappelijk toponderzoek. Sociale grondslagen van nationale bloeiperioden in de negentiende-eeuwse bètarwetenschappen* (Amsterdam 1988)
- Willink, B., *De tweede gouden eeuw. Nederland en de Nobelprijzen voor natuurwetenschappen 1870-1940* (Amsterdam 1998)
- Wilts, A., *Economie als maatschappijwetenschap. Een sociologische geschiedenis van de economische wetenschap in Nederland (ca. 1930-1960)*, proefschrift Universiteit Utrecht (1997)
- Wise, G., *Willis R. Whitney, General Electric, and the origins of U.S. industrial research* (New York 1985)
- Woolf, H. (red.), *Some Strangeness in the Proportion. A Centennial Symposium to Celebrate the Achievements of Albert Einstein* (Reading, Mass. 1980)
- Yang, C.N., 'Square roots of minus one, complex phases and Erwin Schrödinger', in: C.W. Kilmister (red.), *Schrödinger. Centenary celebration of a polymath* (Cambridge 1987) 53-64.
- Zanstra, H., 'Motion relativated by means of a hypothesis of A. Föppl' (Communicated by Prof. P. Ehrenfest at the meeting of March 26, 1921), *Proceedings KAW* 23 (1922) 1412-1418.
- Zimmerman, D., 'The Society for the Protection of Science and Learning and the politicization of British Science in the 1930s', in: *Minerva* 44 (2006) 25-45.
- Ziółkowska, Z., *Theoretical physics in Poland before 1939*, <http://oldwww.fuw.edu.pl/~ajduk/IFT/prehistoryeng.pdf>, geraadpleegd op: 25 februari 2009.

Curriculum Vitae

Marijn Hollestelle werd geboren op 9 september 1977 te Nieuwegein. In 1993 ging hij naar het Oosterlicht College te Nieuwegein, deed daar in 1997 eindexamen Atheneum en begon aan een studie natuurkunde aan de Universiteit Utrecht. In 2002 schreef hij mee aan een artikel over het fotosyntheseproses. Datzelfde jaar begon hij een studie wetenschapsgeschiedenis aan het Instituut voor Geschiedenis en Grondslagen van de Natuurwetenschappen, en liep stage bij het Universiteitsmuseum Utrecht. In 2004 studeerde hij af op een thesis over natuurkunde en pedagogiek in het interbellum.

Na zijn studie gaf het Berlijnse Max-Planck-Instituut hem diverse opdrachten, onder andere bij het Universiteitsmuseum Utrecht. Daarnaast assisteerde hij bij de organisatie van een Summerschool wetenschapsgeschiedenis van het Universiteitsmuseum. In 2006 werd hij door de Universiteit Leiden aangesteld als promovendus aan het Leids Instituut voor Onderzoek in de Natuurkunde. Hij publiceerde onder andere in *Gewina* en in diverse bundels, maar ook in het *NTvN* en *NVOX*. In zijn vrije tijd doet hij aan vechtsport; hij is rijkserkend karate-instructeur.

Na voltooiing van zijn proefschrift werd hij in 2010 door de Stichting Historie der Techniek te Eindhoven aangesteld als postdoc voor het verrichten van een onderzoek naar de geschiedenis van de polymeerchemie in Nederland.