



UNIVERSITEIT VAN AMSTERDAM

---

## Lorentz en Einstein

---

EEN HISTORISCH VERGELIJK TUSSEN LORENTZ' ETHERTHEORIE  
EN EINSTEINS SPECIALE RELATIVITEITSTHEORIE



VERSLAG VAN BACHELORPROJECT NATUUR- EN STERRENKUNDE, OMVANG 12 EC,  
UITGEVOERD IN DE PERIODE 01-03-2010 TOT 01-09-2010

*Student:*

Jelle BRUINEBERG

*Studentnummer:* 5783496

*Begeleider:*

prof.dr. A.J. KOX

*Tweede beoordelaar:*

prof.dr. E. VERLINDE

INSTITUUT VOOR THEORETISCHE FYSICA AMSTERDAM  
FACULTEIT VOOR NATUURWETENSCHAPPEN WISKUNDE EN INFORMATICA  
UNIVERSITEIT VAN AMSTERDAM

## Inhoudsopgave

<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Geschiedenis van de natuurwetenschappen</b>	<b>4</b>
2.1	Natuurfilosofie . . . . .	4
2.2	De Copernicaanse wending . . . . .	5
2.3	Nieuwe dynamica . . . . .	7
2.4	Absolute ruimte . . . . .	8
2.5	Argumenten voor ether . . . . .	9
2.6	Een theorie van licht . . . . .	10
2.7	Experimentele inzichten . . . . .	11
2.8	Richting een elektromagnetische theorie . . . . .	12
<b>3</b>	<b>Lorentz' ether theorie</b>	<b>12</b>
3.1	Relatieve of absolute golven . . . . .	13
3.2	Aberratie . . . . .	13
3.3	Vergelijken van theorieën . . . . .	14
3.4	Een theorie van elektronen . . . . .	15
3.5	Michelson en Morley . . . . .	16
3.6	Lorentz' reactie . . . . .	16
3.7	Lorentz transformaties . . . . .	17
3.8	Lorentz invariantie . . . . .	17
<b>4</b>	<b>Einsteins speciale relativiteitstheorie</b>	<b>18</b>
4.1	Een magnetisch of elektrisch verschijnsel? . . . . .	18
4.2	Het relativiteitspostulaat . . . . .	19
4.3	Het lichtpostulaat . . . . .	21
4.4	Synchroniseren van klokken . . . . .	21
<b>5</b>	<b>Vergelijking van beide theorieën</b>	<b>22</b>
5.1	Vroege ontvangst van de relativiteitstheorie (1905-1911) . . . . .	23
5.2	Reacties op Kaufmann . . . . .	24
5.3	Een wetenschapsfilosofisch vergelijk . . . . .	25
<b>6</b>	<b>Conclusie</b>	<b>26</b>

## **Samenvatting**

In deze scriptie onderzoek ik de verhouding tussen de ethertheorie van Lorentz en de speciale relativiteitstheorie van Einstein. Door de ethertheorie van Lorentz in een historisch perspectief te zetten wordt de achtergrond van deze theorie duidelijker. De problemen die Lorentz en sommigen van zijn tijdgenoten met de later ontwikkelde speciale relativiteitstheorie hadden worden begrijpelijker door ze vanuit het perspectief van Lorentz te bekijken. Daarnaast wordt ingegaan op de veronderstelde breuk tussen de ethertheorie en de speciale relativiteitstheorie, het blijkt dat deze gecompliceerder ligt dan over het algemeen gedacht. Ook het methodologische verschil tussen de twee theorieën is belangrijk. Lorentz stelt op inductieve wijze zijn theorie op, terwijl Einstein vanuit eerste principes de gevolgen van zijn theorie afleidt. De voor- en nadelen van deze methoden worden kort besproken. Als afsluiting vergelijk ik de opkomst van de speciale relativiteitstheorie met de opkomst van een nieuw paradigma zoals dat in de wetenschapsfilosofie van Thomas Kuhn terugkomt. Deze scriptie probeert te laten zien dat in ieder geval deze omslag binnen de natuurkunde op veel punten niet voldoet aan het schema van Kuhn. De praktijk ligt subtieler en gecompliceerder.

## 1 Inleiding

Wie wel eens een magneet naast zijn beeldscherm heeft gehouden weet dat elektriciteit, licht en magnetisme iets met elkaar te maken hebben. De kleuren op het scherm veranderen naar mate de magneet dichterbij het scherm wordt gehouden en als je niet oppast blijf je nog wekenlang een vervelende vlek zien in het scherm. Deze scriptie gaat niet over hoe een televisie werkt of hoe gevaarlijk magneten wel niet kunnen zijn. Deze scriptie gaat over de fascinerende tijd waarin verschillende losse takken van de natuurkunde door grote geesten werden samengebracht en als geheel een ware revolutie, niet alleen binnen de natuurkunde, maar binnen het hele menselijke denken en handelen, teweeg bracht. Men dankt er niet alleen de televisie of het mobieltje aan, maar ook een nieuwe conceptie van tijd en ruimte.

In deze scriptie zal ik proberen een schets te geven van het tijdsbeeld binnen de natuurkunde aan het eind van de 19e eeuw. Elke scriptie over dit tijdperk zal gewag maken van de professor die Max Planck in 1875 aanraadde om toch maar geen natuurkunde te gaan studeren. Er zouden in deze tak van wetenschap geen doorbraken meer te verwachten zijn, slechts kleine aanpassingen van de bestaande theorie. Ik zal proberen de denkstappen van de grootmeesters weer te geven, laten zien welke fundamentele vragen zij zichzelf stelden en welke conclusies zij bereikten. Het is een verhaal over wonderlijke experimenten, nog wonderlijkere gedachtenexperimenten en revolutionaire theorieën.

Meer dan het schetsen van een tijdsbeeld zal ik inzoomen op de gebeurtenissen die tot de speciale relativiteitstheorie van Einstein hebben geleid. Met name het werk van Lorentz speelde een zeer belangrijke rol in deze ontwikkeling. Hoewel zijn ethertheorie op de moderne lezer misschien wat naïef overkomt is zijn werk veel meer dan een opmaat voor Einstein geweest. De uiteindelijke formulering van Lorentz' theorie is wiskundig gezien equivalent aan die van Einstein, maar concepten als ruimte, tijd en ether werden door beiden radicaal anders ingevuld. Ik zal dan ook proberen te beschrijven in hoeverre het werk van Einstein een breuk vormde met zijn voorlopers. Ik zou de natuurkundige lezer dan ook willen vragen zijn eigen paradigma de komende pagina's te laten voor wat het is en zich in te laten met de denkbeelden uit het eind van de 19e eeuw.

Men dient niet te vergeten dat buiten de natuurkundige wereld de romantiek de wereld in zijn greep houdt. Kunstenaars als van Gogh en Rimbaud maken hun meesterwerken. Filosofen als Friedrich Nietzsche, William James en Henri Poincaré beroepen zich op het gevoel en de intuïtie. De hoofdrolspelers van dit verhaal verschillen op meer vlakken dan alleen hun natuurkundige denkbeelden van ons. Ze leefden in een volstrekt andere wereld. Het is aan ons om te integreren in deze samenleving en de verrassingen die ze voor ons in petto heeft op waarde te schatten.

## 2 Geschiedenis van de natuurwetenschappen

When the objects of an inquiry, in any department, have principles, conditions, or elements, it is through acquaintance with these that knowledge, that is to say scientific knowledge, is attained. For we do not think that we know a thing until we are acquainted with its primary conditions or first principles, and have carried our analysis as far as its simplest elements. Plainly therefore in the science of Nature, as in other branches of study, our first task will be to try to determine what relates to its principles. The natural way of doing this is to start from the things which are more knowable and obvious to us and proceed towards those which are clearer and more knowable by nature; for the same things are not knowable relatively to us and knowable without qualification. So in the present inquiry we must follow this method and advance from what is more obscure by nature, but clearer to us, towards what is more clear and more knowable by nature.

- Aristoteles[1]

De natuurkunde waar Lorentz aan het einde van de 19e eeuw mee worstelde is een culminatie van eeuwen opgebouwde kennis. Vanuit de doorbraken van Galileo en Newton in de 17e eeuw is de natuurkunde uitgegroeid tot een consistent geheel, toepasbaar op vrijwel alle aspecten van de dode natuur. Verweven in dit systeem zijn begrippen als ruimte, beweging, kracht en tijd. Begrippen die voor de moderne mens een heel andere lading hebben dan voor wetenschappers uit het verleden. Om de problemen waar Lorentz tegenaan loopt en vooral de oplossingen die hij aandraagt te begrijpen dient men een beeld te hebben van de natuurkundige wereld waar hij op voortbouwt. In dit hoofdstuk zal ik me vooral richten op de concepten van Aristoteles, Newton en Galileo en hoe deze laatste twee een kader schetsen waarbinnen de natuurkunde in de afgelopen eeuwen heeft kunnen groeien. Daarna zal ik proberen te beschrijven hoe binnen dit kader concepten als licht, tijd, plaats en elektromagnetisme zijn doordacht. In deze beschrijving moet duidelijk worden wat er voor Lorentz op het spel staat op het moment dat hij de experimenten van zijn tijd wil laten overeenstemmen met een elektromagnetische theorie.

### 2.1 Natuurfilosofie

De natuurfilosofie van Aristoteles is in zekere zin een voorloper van zowel de moderne natuurwetenschap als de filosofie. Aristoteles zoekt vanuit de empirie naar oorzaken van verschijnselen. Zijn denken is er op gericht de oorzaak van verschijnselen te vinden. Deze oorzaak is niet noodzakelijk causaal, maar kan net zo goed een doelmatige oorzaak zijn. Aristoteles classificeert een aantal oorzaken voor verschijnselen. De bewegingen van mensen, dieren en planten zijn de actualisering van een potentialiteit, net als bijvoorbeeld het groeien van een plant dat is. Levenloze objecten hebben een andere bewegingsoorzaak. Aristoteles ziet in de levenloze natuur een patroon in de verschijnselen : een steen rolt altijd van een berg af en zinkt in water, luchtbelletjes stijgen op uit water, vlammen

reiken omhoog. Dit leidt Aristoteles er toe om een natuurlijke orde van elementen aan te brengen. Van onder naar boven: aarde, water, lucht en vuur. Daarboven bevindt zich de ether, het materiaal waar de eeuwige sferen uit zijn opgebouwd. Aristoteles maakt een onderscheid tussen natuurlijke en gedwongen beweging. Natuurlijke beweging is de beweging die een object vanuit zijn innerlijke noodzaak naar zijn natuurlijke rustpunt maakt. Gedwongen beweging is de beweging die een object door externe aandrijving maakt. Dit heeft invloed op zijn mechanica: een object in zijn natuurlijke rustpunt zal als het niet wordt aangedreven uit zichzelf tot stilstand komen. Als een object met constante snelheid dient te bewegen, dan dient het continu aangedreven te worden.

Deze visie komt overeen met de alledaagse aardse belevingswereld. De dagelijkse praktijk is dat de meeste objecten stilstaan en dat bewegende objecten continu arbeid uitoefenen (een vogel) of naar hun natuurlijke rustpunt toebewegen (een waterval). Voor Aristoteles is een natuurlijke beweging op aarde altijd een rechte beweging met een beginpunt en een eind. In het bovenaardse gelden echter hele andere bewegingswetten. Aristoteles observeert dat de hemellichamen in een perfecte cirkel om de aarde heen bewegen, zonder dat ze daarbij aangedreven worden. Deze observatie is consistent met de metafysische opvatting dat het aardse vergankelijk is en het bovenaardse eeuwig.

Deze bewegingsleer valt of staat bij een geocentrisch wereldbeeld. In het begrip rustpunt ligt al besloten dat de aarde zelf het uiteindelijke rustpunt is. Ook is de tweedeling is de beweginsleer onhoudbaar als de aarde geen bevoorrechte plaats in het universum heeft. Het was dit geocentrische wereldbeeld dat het einde van de Aristoteliaanse dynamica zou betekenen.

## 2.2 De Copernicaanse wending

In de 16e eeuw zorgt het werk van Nicolaus Copernicus voor een revolutie in de natuurwetenschappen. Zijn originele werk *De Revolutionibus Orbium Coelestium* richt zich op de beweging van de hemellichamen. Copernicus had een aantal bezwaren tegen het wereldbeeld van Ptolemaeus, een Griekse astronoom uit de tweede eeuw na Christus en een van de opvolgers van Aristoteles. Tegende de Aristotelische bewegingsleer op zich had Copernicus geen bezwaren. Sterker nog, zijn belangrijkste bezwaar tegen het Ptolemaeïsche model is juist dat het niet voldoende beantwoordt aan de Aristotelische eisen. Het Ptolemaeïsche model gebruikt epicykels, een planeet beweegt zich voort op een cirkelbaan waarvan het middelpunt weer op een cirkelbaan rond de aarde gelegen is. Daarnaast gebruikt Ptolemaeus equanten, een ingewikkeld mechanisme waarbij bijvoorbeeld de aarde wel in het middelpunt van de baan van de zon staat, maar de uniforme beweging van de zon ten opzichte van een ander hypothetisch punt plaats vindt. Op ingenieuze wijze kan Ptolemaeus de banen van de planeten voorspellen. Volgens Copernicus voldoet de equant niet aan de Aristotelische eisen, hij probeert een model te vinden dat de planeetbanen voorspelt zonder dat gebruik te maken van equanten. Het nieuwe model van Copernicus plaatst de zon in het midden en laat de aarde om zijn eigen as draaien. [9]

Uiteindelijk is Copernicus niet in staat om werkelijk een eenvoudiger model te maken. Hijzelf ziet een model zonder equanten als een duidelijke vooruitgang, maar het model is

geenszins modernier of meer Newtoniaans dan het model uit de Oudheid. Men zou zelfs kunnen zeggen dat Copernicus' model rechter in de Aristoteliaanse en scholastische leer is dan het Ptolemaeïsche model. [10]

Niettemin is deze Copernicaanse wending toch het begin van een revolutie in de natuurwetenschap, of beter gezegd: het losmaken van de natuurwetenschap uit de natuurfilosofie om een eigen vakgebied te ontginnen. In de anderhalve eeuw tussen het uitkomen van *De Revolutionibus* en het uitkomen van Newton's *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* maakt het Aristotelische wereldbeeld plaats voor een modern wereldbeeld. Veranderingen vinden niet alleen plaats in de astronomie, maar ook in de natuurkunde, de filosofie en de religie.

Het nieuwe wereldbeeld stuit op heftige kritiek vanuit theologische kringen. Pikant is de reactie die kerkhervormer Maarten Luther optekent in zijn Tischreden. Het toont de intuïtieve drang naar een voorkeursstelsel waarin de aarde in rust is. Ook maakt Luther gebruik van dezelfde metafoor die Galileo later zal gebruiken om zijn relativiteitsprincipe uiteen te zetten.

There is talk of a new astrologer who wants to prove that the earth moves and goes around instead of the sky, the sun, the moon, just as if somebody were moving in a carriage or ship might hold that he was sitting still and at rest while the earth and the trees walked and moved. But that is how things are nowadays: when a man wishes to be clever he must needs invent something special, and the way he does it must needs be the best! The fool wants to turn the whole art of astronomy upside-down. However, as Holy Scripture tells us, so did Joshua bid the sun to stand still and not the earth.[16]

Als duidelijk wordt dat de aarde om de zon draait wordt de verdere Aristotelische dynamica ook onhoudbaar. De natuurlijke rustplaats van de elementen valt niet te verenigen met een bewegende aarde. Ook de tweescheiding van boven- en ondermaanse natuurwetten wordt problematisch aangezien de Aarde wordt gedegradeerd tot een van de planeten die om de zon draaien. <sup>1</sup> Het was Kepler die voor het eerst een sterk vereenvoudigd model op kon stellen. Doordat hij afstapte van de cirkelvormige beweging maar ellipsvormige beweging invoerde kon hij de baan van de planeet Mars beschrijven zonder daarbij epicykels nodig te hebben. Hij is aanvankelijk op zoek naar de verhouding tussen de banen van de hemellichamen en is overtuigd van een kosmische orde in deze verhouding. Uiteindelijk vindt hij zijn drie beroemde wetten die de banen van planeten, hun snelheid en omlooptijd beschrijven.

Hierbij rijst direct een volgend probleem: als de hemelbanen niet op koers worden gehouden door de hemelse sferen, hoe dan wel? Kepler voert hier het Latijnse woord *vis* in, kracht. Hiermee heeft hij niet het moderne idee van een kracht voor ogen, maar eerder een occulte magnetische kwaliteit van de hemellichamen. Interessant is het dat Kepler, en met hem vrijwel de complete wetenschap in zijn tijd, weliswaar minder invloed van

---

<sup>1</sup>De overgang naar de Aarde als slechts een van de planeten is gradueel. Veel wetenschappers zagen het (al dan niet door toedoen van de kerk) vooral als instrumenteel hulpmiddel.

de theologie ondervindt, maar des te meer wordt beïnvloed door een occult metafysisch wereldbeeld. Newton zal later de wetten van Kepler afleiden uit zijn eerste principes.

Ook de empirische wetenschap komt op, Galileo gebruikt als een van de eersten een telescoop om de hemellichamen te bestuderen. Het pokdalige aangezicht van de maan en de vele manen van Jupiter komen niet overeen met de ideale vormen van Aristoteles maar zijn eenstemmer een bewijs dat er geen fundamenteel verschil tussen het aardse en bovenaardse is.

### 2.3 Nieuwe dynamica

Galileo laat zien dat Aristoteles' tweedeling van beweging niet compleet is. Er zijn objecten die wel bewegen maar niet dichtbij of verderweg hun natuurlijke plaats komen. Andere objecten tollen rond hun eigen as zonder dat ze door een externe kracht worden aangedreven.

Bij Aristoteles is de ideale beweging van een object de ongehinderde gang naar zijn natuurlijke rustpunt. De vernieuwende denkstap van Galileo is dat hij het ideale geval omkeert. Beweging is een intrinsieke eigenschap van een object dat als er geen externe krachten op werken oneindig door zal bewegen. Aristoteles beschrijft beweging als een overgang tussen twee toestanden, terwijl Galileo beweging als een toestand op zichzelf ziet en misschien *versnelling* als de overgang tussen twee toestanden.

Galileo was als een van de eersten in staat om zijn theorie te onderbouwen met observaties, experimenten en abstracte gedachtenexperimenten. Waar Kepler ellipsen gebruikt, houdt Galileo vast aan cirkelvormige planeetbanen. Galileo vormt een cirkelvormig traagheidsprincipe, niet zo algemeen als later door Newton zal worden geponeerd, volgens hem is alleen cirkelvormige beweging natuurlijk en kan zonder externe bron voortduren. Opvallend is dat Galileo nergens expliciet de link met de beweging van hemellichamen maakt, deze ontdekking was voorbehouden voor Newton. [4] [3]

Galileo gaat echter wel verder op de beweging van de aarde zelf om zijn eigen as. Als men een emmer water in de hand neemt en daar een bal in laat drijven, zal de bal als men de emmer ronddraait een rotatie meekrijgen tegengesteld aan de rotatie van de emmer. Galileo probeert zo te laten zien dat de beweging van de aarde om zijn eigen as, zoals die door de theorie van Copernicus werd vereist, een vrije beweging is.

Maar als de aarde om zijn eigen as draait, waarom merken we dan niet dat er bewegen? Ook op deze vraag heeft Galileo een passend (gedachten) experiment. In zijn boek *Dialogue Concerning the Two Chief World Systems* laat Galileo zijn fictieve medestander Salviati vertellen:

Shut yourself up with some friend in the main cabin below decks on some large ship, and have with you there some flies, butterflies, and other small flying animals. Have a large bowl of water with some fish in it; hang up a bottle that empties drop by drop into a wide vessel beneath it. With the ship standing still, observe carefully how the little animals fly with equal speed to all sides of the cabin. [.....] When you have observed all these things carefully (though doubtless when the ship is standing still everything



must happen in this way), have the ship proceed with any speed you like, so long as the motion is uniform and not fluctuating this way and that. You will discover not the least change in all the effects named, nor could you tell from any of them whether the ship was moving or standing still. [.....] the butterflies and flies will continue their flights indifferently toward every side, nor will it ever happen that they are concentrated toward the stern, as if tired out from keeping up with the course of the ship, from which they will have been separated during long intervals by keeping themselves in the air. And if smoke is made by burning some incense, it will be seen going up in the form of a little cloud, remaining still and moving no more toward one side than the other. The cause of all these correspondences of effects is the fact that the ship's motion is common to all the things contained in it, and to the air also. [7]

Hoewel tegenwoordig vaak de trein als voorbeeld wordt genomen, was in Galileos tijd een schip waarschijnlijk het beste voorbeeld van eenparige rechte beweging. Galileo laat zien dat benedendeks op een schip geen verschil wordt waargenomen tussen stilstand en eenparige beweging. Dit principe zal door Newton tot een meer uitgebreid relativiteitsbegrip worden uitgewerkt.

De opvatting van beweging is niet het enige breekpunt van Galileo met Aristoteles. Galileo verwerpt de Aristotelianse fysica op een veel grotere schaal. Het uitgangspunt van Galileo is dat 'het boek der natuur is geschreven in de taal van de wiskunde.' Hiermee doet Galileo afstand van het dagelijks taalgebruik en kwalitatieve beschrijvingen als wetenschappelijke verklaringen en staat hij aan het begin van een kwantitatieve, wiskundig georiënteerde traditie. De wiskunde waar Galileo op doelt in zijn uitspraak is niet de algebra zoals we die nu kennen, maar bovenal de meetkunde. De inzichtelijkheid die er van uit gaat en het stelsel axiomas als grondbeginselen waar overige resultaten van worden afgeleid is niet alleen een ideaal voor de wetenschap, maar ook voor filosofen als Descartes en Spinoza die op eenzelfde logische wijze hun wereldbeeld opbouwen.

Volgens Galileo wordt een object volledig gekarakteriseerd door zijn eigen kwaliteiten (zoals omvang, massa, plaats etc.) Er zijn geen externe doelloorzaken nodig om het gedrag van een object te voorspellen. Galileo's beroemde experiment van de valversnelling begint bij het secuur beschrijven van de waarnemingen en er vervolgens een wet uit afleiden.

## 2.4 Absolute ruimte

We hebben gezien dat Luther het idee dat de aarde om de zon draait belachelijk maakte door te stellen dat dit gelijk is aan een schip stil te laten staan en de aarde rond te laten draaien. Een moderne lezer zou naar alle waarschijnlijkheid Luther met exact hetzelfde argument van repliek dienen. Hoe zou iemand met gezond verstand kunnen beargumenteren dat het schip (de aarde) stil zou staan en de aarde (het zonnestelsel) zou bewegen? Dit soort relativiteitsdenken is voor de moderne lezer intuïtiever dan voor een wetenschapper uit de 17e eeuw.

De Galileo transformaties transformeren rechtlijnige eenparige bewegingen en stelt dat deze beschrijvingen equivalent zijn. Voor andersoortige bewegingen is het niet zo makkelijk een beschrijving los van een absoluut rustpunt te vinden. Galileo ziet het verschil in tussen kinematische effecten die door middel van een translatie vanuit een rusttoestand kunnen beschreven en dynamische effecten die wezenlijk anders zijn dan de rusttoestand. In een Scholium, een extra aantekening, aan het begin van zijn *Principia Mathematica* beschrijft Newton zijn visie op tijd en ruimte. Hij beschrijft een experiment met een emmer vol water dat in zijn ogen een geldig argument is voor het bestaan van een absolute ruimte.

Een emmer met water hangt aan een touw. De emmer is een aantal malen rondgedraaid zodat het touw onder spanning staat. Als de emmer wordt losgelaten begint het met draaien. Allereerst draait alleen de emmer en is het water in de emmer in rust. Het oppervlak van het water blijft vlak. Na verloop van tijd begint het water steeds meer mee te bewegen met de emmer en begint het water tegen de rand op te staan. Het water is nu in rust ten opzichte van de emmer, net als in de uitgangspositie, maar nu staat het water tegen de rand van de emmer op. Newton concludeert hieruit dat er geen Galileo transformaties voor cirkelvormige beweging opgesteld kunnen worden, maar dat er een fundamenteel verschil is tussen een emmer met water in rust en een draaiende emmer met water.

Maar, vraagt Newton, met rust ten opzichte van wat? Het is niet de toeschouwer die als referentiepunt fungeert. Als de toeschouwer in tegenovergestelde richting om de emmer heen rent zou het wateroppervlak ook moeten gaan bollen, dit gebeurt natuurlijk niet. Newton vindt in dit experiment het bewijs voor een absoluut rustframe, de absolute ruimte, relatief waarvan de emmer beweegt. Later zal er kritiek op dit argument komen, met name van Ernst Mach. Voor nu is het voldoende het argument en de conclusies voor Newton te noemen.[26]

## 2.5 Argumenten voor ether

Hoe deze absolute ruimte Newton precies voor ogen staat wordt duidelijker als we naar de 17e eeuwse visie op traagheid en zwaartekracht kijken. De notie van een kracht op afstand was problematisch in de 17e eeuwse wetenschap. Deze wetenschap probeerde zich af te zetten tegen occulte stromingen die gebruik maakten van allerlei mystieke krachten om fenomenen te verklaren. Kracht op afstand was net zo'n fenomeen, het onttrekt zich aan de wet van de causaliteit. Descartes stelt zichzelf tot doel het universum te verklaren in krachten van druk en botsingen, termen die wel aan causaliteit voldoen. Om te verklaren dat de maan en de aarde kracht op elkaar uitoefenen heeft Descartes een mechanisme nodig dat die kracht via druk en botsingen kan overbrengen. Hij concludeert hieruit dat de ruimte tussen de aarde en de maan niet leeg kan zijn, maar gevuld is met kleine deeltjes: ether. Deze deeltjes zijn niet waar te nemen, maar zijn wel in staat om in deeltjes die erdoor omgeven worden veranderingen teweeg te brengen.

Newton staat ambivalent tegenover deze opvatting van Descartes. Hij komt op andere gronden tot het bestaan van een ether, maar keert zich fel tegen de werkwijze van Descartes. Hij verwijt Descartes dat hij los van de wereld hypothesen verzint en die

vervolgens niet aanpast als deze door de empirie worden weerlegd. Aan het slot van de *Principia* schrijft Newton dat hij niet uit is op een verklaring voor zwaartekracht of kracht op afstand.

Tot nu toe heb ik de verschijnselen van de hemellichamen en van onze zee verklaard door de gravitatiekracht, maar de oorzaak der gravitatie heb ik niet gegeven. Deze kracht ontstaat in alle geval uit een oorzaak, die doordringt tot in de middelpunten van de zon en de planeten - zonder vermindering van sterkte, en die niet werkt naar verhouding van het oppervlak der deele waarop zij werkt, maar naar verhouding van de geheele hoeveelheid stof, en waarvan de werking zich uitstrekt naar alle zijden over onmetelijke afstanden, steeds afnemend in reden van het vierkant van den afstand...

Den grond echter van deze eigenschappen der zwaarte heb ik uit de verschijnselen nog niet kunnen afleiden en hypothesen verzin ik niet.

Wat niet uit de verschijnselen wordt afgeleid, moet hypothese genoemd worden. Maar voor hypothesen, hetzij metafysische of fysische, of zulke der verborgen eigenschappen, of mechanische, is geen plaats in de experimentele filosofie. In deze filosofie worden stellingen afgeleid uit verschijnselen en algemeen gemaakt door inductie. Op deze wijze zijn de ondoordringbaarheid, de bewegelijkheid en de botsing der lichamen en de wetten der bewegingen bekend geworden.

Het is voldoende, dat de zwaartekracht werkelijk bestaat en werkt volgens de door ons uiteengezette wetten, en toereikend is voor de verklaring van alle bewegingen der hemellichamen en van de zee.[27]

Net als Galileo richt Newton zich meer op een wiskundige beschrijving van fenomenen in plaats van een beschrijving van het *wezen* van de fenomenen. Hij hoeft niet te verklaren hoe twee objecten elkaar aantrekken, het is voldoende te laten zien dat ze elkaar aantrekken. Toch laat Newton aan het eind van de *Principia* geen twijfel over zijn wereldbeeld bestaan. De exacte eigenschappen van de ether zijn misschien nog onbekend en dienen vooral niet met premature hypothesen te worden gesteld, over het bestaan van een ether als zodanig valt niet te twisten.

that one body may act upon another at a distance through a vacuum, without the mediation of anything else, . . . is to me so great an absurdity, that I believe no man, who has in philosophical matters a competent faculty of thinking, can ever fall into.

## 2.6 Een theorie van licht

Van de 17e tot de 20e eeuw was de natuurwetenschappelijke wereld in twee kampen verdeeld over het karakter van licht. Aan de ene kant de deeltjestheorie van Newton en aan de andere kant de pulstheorie van Huygens. De theorie van Huygens wordt vaak voorgesteld als een golftheorie. Huygens baseerde zijn theorie op de corpusculaire theorie

van Descartes. Volgens Huygens bestaat de ether uit kleine deeltjes die de eigenschap hebben dat ze een beweging kunnen doorgeven zonder daarbij zelf te verplaatsen. Deze pulsen planten zich voort door de ether. Elk deeltje op zich is weer een onafhankelijke bron voor een puls. Op plekken waar de pulsen elkaar versterken is er licht, op de andere plekken is er schaduw. Met deze theorie kan Huygens erg goed refractie en reflectie verklaren. Hij verklaart refractie door aan te nemen dat in een dichter medium de elasticiteit van de ether wordt verminderd door deeltjes van het medium en dat zodoende de snelheid van de deeltjes kleiner wordt. De pulsen van Huygens gedragen zich feitelijk hetzelfde als een golftheorie. Het verschil is dat een golftheorie periodiciteit vereist, in de theorie van Huygens volgen de pulsen elkaar met onregelmatige tussenpozen op.[30]

Zoals eerder beschreven twijfelt Newton niet aan het bestaan van een ether. Toch baseert hij zijn lichttheorie op deeltjes en niet op golven. Een voorloper van Huygens, Robert Hooke, schreef de kleur van licht toe aan de afbuiging van het golffront van lichtpulsen. Wit licht zou corresponderen met een rechte hoek, terwijl andere kleuren corresponderen met verschillende afbuigingen. De reden dat het licht van kleur verandert komt volgens Hooke doordat bijvoorbeeld rood niets anders is dan de indruk op de retina van een diffuse en schuine lichtpuls, waarvan het sterkste deel eerst komt en daarna het zwakste deel. Zodra Newton een prisma in handen kreeg, concludeerde hij dat deze theorie niet juist kan zijn. Newton nam een band van kleuren waar. In Hookes theorie zou het spectrum cirkelvormig moeten zijn.

Newton construeerde daarop zelf een theorie gebaseerd op het deeltjeskarakter van licht. Volgens hem is een witte of natuurlijke lichtstraal opgebouwd uit alle kleuren samen en hangt een bepaalde kleur samen met een bepaalde diffractiegraad. Op deze manier verklaart Newton het spectrum dat hij waarneemt in zijn prisma-experiment.[31]

Zoals eerder gezegd is de discussie tussen licht als deeltje of als golfverschijnsel een zeer uitgebreide en langdurige geweest. Intrigerend aan deze discussie is de vrijwel oneindige hoeveelheid experimenten die er met licht kunnen worden gedaan. Sommigen daarvan pleitten voor licht als deeltje, sommigen voor licht als golf. Een interessant en ambigu experiment is de ontdekking dat een bepaalde steen, *Bologna phosphorus*, licht geeft in het donker als het eerder aan licht is blootgesteld. Deze ontdekking lijkt op het eerste gezicht te pleiten voor een deeltje dat wordt opgeslagen en later weer wordt uitgezonden. Als echter blijkt dat de steen niet dezelfde kleur uitstraalt als waarmee deze beschenen wordt is dit weer een argument voor de golfhypothese.[32]

## 2.7 Experimentele inzichten

In de eeuw na de *Optica* van Newton bleef de deeltjestheorie prevaleren boven de golftheorie van licht. Hier komt een einde aan als Thomas Young in 1801 zijn dubbele-spleet experiment uitvoert. Als Young zich in de jaren daarvoor bezig gaat houden met optica merkt hij op dat de deeltjestheorie eist dat een lichtdeeltje met gelijke snelheid door zowel een zwakke vonk of als door de zon zelf wordt afgevuurd. Dit is volgens Young merkwaardig. In de golftheorie is de constante snelheid van licht niet problematisch, net

zoals bij een geluidsgolf is de snelheid van een lichtgolf afhankelijk van het medium waar het doorheen reist. [33]

Young bedacht een even simpel als inzichtelijk experiment om zijn vermoeden dat licht een golfkarakter had te toetsen. Hij laat een lichtbron schijnen op een oppervlak met twee spleten erin op een zekere afstand van elkaar. Verderop staat een volgend scherm waar het licht uit de spleten op valt. De Newtoniaanse zienswijze zou zijn dat het patroon dat het licht vormt gelijk is aan de som van alleen de linker en alleen de rechterspleet. Young observeert echter dat er een interferentiepatroon ontstaat. Op sommige punten dooft het licht uit de twee spleten elkaar uit en op andere punten versterkt het elkaar. Een golftheorie van licht kan dit verschijnsel veel beter verklaren dan een deeltjestheorie.

De wiskundige onderbouwing en uitwerking van de theorie van Young wordt uitgevoerd door Augustin-Jean Fresnel. Hij ontwikkelt een golftheorie die ook een verklaring biedt voor polarisatie. Door het werk van Young en Fresnel maakt de deeltjeshypothese in snel tempo plaats voor de golfhypothese.

## 2.8 Richting een elektromagnetische theorie

Halverwege de 19e eeuw houdt Maxwell zich bezig met de unificatie van elektrische en magnetische theoriën. Hij leidt vier basisvergelijkingen af die elektromagnetische verschijnselen beschrijven. Vanuit deze vier vergelijkingen leidt hij een golfvergelijking af die zich in vacuum voortplant met de lichtsnelheid.

The agreement of the results seems to show that light and magnetism are affections of the same substance, and that light is an electromagnetic disturbance propagated through the field according to electromagnetic laws.[17]

Deze stap lijkt doorslaggevend te zijn in het debat over licht. Hoewel ook de elektromagnetische theorie nog in de kinderschoenen staat, beschrijven de Maxwell-vergelijkingen het gedrag van elektromagnetische fenomenen erg goed. De golfvergelijkingen verklaren op elegante wijze verschijnselen als breking, refractie en interferentie. De elegantie en symmetrie die vervolgens van haar vergelijkingen afstralen noopt sommige wetenschappers tot de verklaring dat de natuurkunde af is. Er waren nog slechts enkele gaten in de theorie. In het volgende hoofdstuk zullen we zien hoe Lorentz een van deze gaten probeert te vullen, maar tijdens het graven stuit op de fundamenteën van de natuurkunde.

## 3 Lorentz' ether theorie

In het vorige hoofdstuk is een beeld geschetst van het paradigma waarin Lorentz wetenschap bedreef. Nu kunnen we de puzzelstukjes in elkaar gaan passen en laten zien op welke moeilijkheden dit stuit voor een elektromagnetische theorie van bewegende lichamen. We hebben gezien dat er een werkbare theorie voor elektromagnetische verschijnselen is opgesteld door Maxwell, deze kan in het laboratorium verschijnselen zeer

goed beschrijven. Doordat Maxwell laat zien dat licht ook te beschrijven valt als elektromagnetische golf, wordt zijn theorie op een veel breder terrein toepasbaar. Men hoopte dat astronomische verschijnselen die in de eeuwen daarvoor ontdekt waren nu in een theoretisch kader konden worden geplaatst, maar ook konden astronomische verschijnselen een toets zijn voor verschillende elektromagnetische hypothesen.

### 3.1 Relatieve of absolute golven

Een typische eigenschap van golven lijkt te zijn dat ze een medium nodig hebben om in voort te planten. Geluid bestaat uit longitudinale drukverschillen in lucht en watergolven planten zich voort in water. Het is daarom logisch te concluderen dat licht als golf ook een medium nodig heeft om zich in voort te planten. Aangezien licht door vacuum kan reizen, door water en alle andere transparante media, moet men concluderen dat de ether (al dan niet gedeeltelijk) in al deze media kan doordringen. De vraag blijft naar wat deze ether nou precies voor eigenschappen heeft. Als we de rotatie om zijn as buiten beschouwing laten draait de aarde in ieder geval om de zon heen. Draait dan het hele stelsel van de ether met de aarde mee om de zon of staat de ether juist stil in een absoluut rustframe zoals Newton daar argumenten voor had? Maar ook de zon zou kunnen bewegen ten opzichte van de ether. Als de ether niet met de aarde mee zou bewegen, dan zouden de gevolgen daarvan op aarde meetbaar moeten zijn. Stel dat de aarde in een rechte lijn door een stilstaande ether zou bewegen, dan zou licht van de tegemoetkomende kant een hogere snelheid moeten hebben dan van de tegenovergestelde kant. Een serieuze ethertheorie moet dus overeenkomen met gedane experimenten. We zullen zien dat een continue wisselwerking tussen theorie en experiment, de theorie uiteindelijk steeds minder elegant maakt en uiteindelijk in een crisis belandt.

### 3.2 Aberratie

In 1728 is James Bradley op zoek naar de parallax van een bepaalde ster in het sterrenbeeld Draak. In plaats van dat hij de parallax meet, merkt hij op dat de ster in de zomer de meridiaan noorderlijker passeert dan in de winter. Bradley zelf verklaart dit zelf in de deeltjestheorie en door een eindige lichtsnelheid aan te nemen in combinatie met de beweging van de aarde rond de zon. Stel dat een lichtstraal uitgezonden uit C geobserveerd wordt door een waarnemer die voortbeweegt op lijn BA. Een lichtdeeltje dat wordt uitgezonden door C op het punt dat de waarnemer op punt B is, zal door de waarnemer op punt A worden waargenomen, maar vanuit de richting BC. De positie die wordt waargenomen door een observator is dus niet de ware positie van het object, maar is afhankelijk van de beweging van de waarnemer.<sup>2</sup>

Op geometrische wijze is eenvoudig te berekenen dat de sinus van de verschillende hoeken zich verhoudt als de bewegingssnelheid van de waarnemer tot de lichtsnelheid. Dit stelde Bradley in de gelegenheid om te laten zien dat de snelheid van lichtdeeltjes onafhankelijk is van de afstand tot de lichtbron. In het vorige hoofdstuk hebben we

---

<sup>2</sup>In het geval van de aberratie van sterlicht kan de ster als stilstaand worden beschouwd en de invallende lichtstralen als evenwijdig.

gezien dat deze opvatting moeilijker met de deeltjestheorie dan met de golftheorie in overeenstemming valt te brengen.[34] Nu de golftheorie de overhand krijgt boven de deeltjestheorie valt aberratie juist moeilijker te verklaren. Als de ether in beweging is zal licht zich niet via rechte lijnen voortbewegen, maar meebewegen met de ether. Er moet dan een andere verklaring voor aberratie worden gevonden.

### 3.3 Vergelijken van theorieën

Lorentz zelf vertrekt van dit punt in zijn lezingenserie *The theory of electrons*. Hij heeft zich al langere tijd met elektromagnetisme en bewegende lichamen beziggehouden, maar deze lezingenserie, stammend uit 1906, een jaar na het beroemde artikel van Einstein, vormt een goede resume van zijn werk tot dan toe.[11]

Lorentz onderzoekt welke eigenschappen van licht kunnen beslissen tussen een theorie waarin de ether wordt meegetrokken door de aarde zoals voorgesteld door Stokes en een theorie waarbij beweging van de aarde geen invloed heeft op de ether, zoals beschreven door Fresnel. Als eerste noemt hij aberratie, maar ook het feit dat zodra de eigenschappen van sterlicht eenmaal gemeten zijn, de uitkomst van experimenten met refractie en reflectie kan worden bepaald zonder daarbij verder gebruik te maken van de beweging van de aarde. Ook kunnen experimenten met aardse lichtbronnen worden gedaan zonder te refereren naar de relatieve richting van het experiment ten opzichte van de ether. Hier zie je terug dat het lang niet vanzelfsprekend was dat licht van sterren dezelfde eigenschappen bezat als licht van aardse bronnen. [12]

De theorie van Stokes lijkt deze verschijnselen makkelijker te verklaren dan die van Fresnel. Stokes beschrijft een ethermodel waarin aan het oppervlak van de aarde geen relatieve beweging is tussen het oppervlak van de aarde en de omringende ether. Hoe hoger in de atmosfeer hoe minder de ether wordt meegetrokken door de aarde. Op een zekere afstand is de ether in rust. Een andere eis die hij moet stellen aan zijn ethertheorie is de irrotationaliteit van de ether. Met deze aannames laat hij zien dat een lichtgolf zich nog steeds in dezelfde richting voortplant, maar dat het golffront gekanteld is ten opzichte van de voortplantingsrichting. Door deze kanteling lijkt het alsof het licht uit een andere richting komt dan waar de werkelijke oorsprong. Dit verschil komt overeen met de aberratie die Bradley gemeten heeft. [35]<sup>3</sup>

De andere eisen die Lorentz stelt kunnen ook goed door Stokes worden verklaard. Doordat er op het aardoppervlak geen relatieve beweging tussen de ether en materie is, kan goed worden verklaard dat experimenten met licht onafhankelijk zijn van hun positie ten opzichte van de etherwind.

Lorentz ziet echter een grote fout in de theorie van Stokes. De aannames van irrotationaliteit en wrijvingsloosheid op het aardoppervlak zijn met elkaar in tegenspraak. Er kan simpelweg geen model bestaan dat aan beide noodzakelijke aannames voldoet. Lorentz construeert een irrotationele snelheidspotentiaal en laat zien dat de de snelheid op het oppervlak van een bewegende bol niet nul kan zijn.[13]

---

<sup>3</sup>Voor een wiskundige afleiding van de theorie van Stokes zie <http://www.mathpages.com/HOME/kmath561/kmath561.htm>

Aan de andere kant stelt de theorie van Fresnel dat de ether in het geheel niet wordt beïnvloed door de beweging van de aarde. Daarnaast stelt Fresnel een mechanisme voor de voortplanting van licht in transparante media voor. Licht dat zich voortplant in een transparant medium wordt voor een deel voortgeplant door de ether en voor een ander deel door het medium zelf. De verhouding waarin dit gebeurt heet de Fresnel meeslepingscoëfficiënt. Deze is 0 als al het licht door de ether wordt voortgeplant en 1 als de materie het licht compleet voortplant. De vraag is nu wat deze coëfficiënt precies is. Fresnel berekende op basis van de relatie tussen etherdichtheid en brekingsindex een uitdrukking voor deze coëfficiënt:  $1 - \frac{1}{N^2}$ .

Dat deze uitdrukking experimenteel kan worden getoetst wordt duidelijk als we terugkeren naar de Galileo transformaties. Lorentz zegt hierover in zijn *theory of electrons*

I believe every one will be ready to admit that an optical phenomenon which can take place in a system that is at rest, can go on in exactly the same way after a uniform motion of translation has been imparted on this system, provided that this be given to *all* that belongs to the system. If, therefore, all that is contained in a column of water or in a piece of glass shares a translatory motion which we communicate to these substances, the propagation of light in their interior will always go on in the same manner, whether there be a translation or not. The case however be different, if the glass or the water contains something which we cannot set in motion.[14]

De theorie van Fresnel postuleert dat de ether niet mee transleert met de rest van de beweging. Dit biedt perspectieven voor een experiment dat de Fresnel coëfficiënt kan bepalen. Stromend water zou dan immers een andere lichtsnelheid moeten opleveren dan stilstaand water. Uit de snelheid van het water en het gemeten lichtsnelheidsverschil kan de Fresnel coëfficiënt worden berekend. In 1851 voerde Fizeau dit experiment uit. Allereerst onderzocht hij het verschil tussen een lege buis en een buis gevuld met water en vond geen verschil in fase. Vervolgens liet hij water stromen door de buis en observeerde de ‘fringe shift.’ Het blijkt dat de ‘fringe shift’ tot op eerste orde  $\frac{v}{c}$  overeenkomt met de Fresnel coëfficiënt.[18]

### 3.4 Een theorie van elektronen

Voordat we verdergaan dient het een en ander duidelijk te worden gemaakt. Allereerst is Lorentz niet alleen geïnteresseerd in een optische theorie, maar wil hij een universele theorie construeren die zowel elektromagnetische als optische fenomenen beschrijft. Zoals eerder beschreven ontdekt Maxwell dat licht een elektromagnetische golf is. Dit geldt natuurlijk ook andersom, theorieën die optische verschijnselen beschrijven worden toepasbaar op elektromagnetische fenomenen. Maar elektromagnetisme bestaat uit meer dan elektromagnetische golven. Lorentz zelf is op zoek naar een beschrijving van de toestanden van de ether onder invloed van bewegende geladen deeltjes. Lorentz is hierbij beïnvloed door de hoge toepasbaarheid van Fresnels theorie en de experimentele verificatie van Fizeau. Om tot een universele theorie te komen modificeert Lorentz de theorie van Fresnel. Zijn hybride theorie neemt zowel aan dat op het aardoppervlak de



ether irrotationeel beweegt, zoals bij Stokes, maar dat deze niet stilstaat ten opzichte van het aardoppervlak. Daarnaast stelt hij dat, zoals bij Fresnel, materie voor een deel de ether meevoert. Licht plant zich ook in deze meegevoerde ether voort.[36] Met deze hybride theorie kan Lorentz verklaren waarom eerste orde experimenten een nulresultaat opleveren. Lorentz veronderstelt wel een effect in de tweede orde, maar slechts enkele experimenten kunnen effecten in de tweede orde meten.

### 3.5 Michelson en Morley

De klassieke versie van het beroemde experiment van Michelson en Morley vond plaats in 1887. Het doel was om de snelheid van de aarde door de ether te meten. Een eerste versie van het experiment, uitgevoerd door Michelson, uit 1881 mat geen 'fringe shift' waardoor aanvankelijk Stokes' theorie werd bevestigd en Fresnels theorie ontkracht. Dit was echter voor dat Lorentz de fundamentele tegenspraak in het werk van Stokes ontdekte. Daarnaast wijst Lorentz Michelson op een rekenfout waardoor de verwachte 'fringe shift' nog een factor twee lager uitvalt en het experiment niet definitief uitsluitsel kan bieden. In de versie van 1887 zijn een aantal methodische veranderingen aangebracht en is de kritiek van Lorentz verwerkt. De padlengte van de lichtstralen wordt door middel van spiegels sterk vergroot waardoor het experiment stukken nauwkeuriger werd. Ook in dit experiment werd niet de minste verschuiving gevonden.<sup>4</sup>

### 3.6 Lorentz' reactie

Zoals gezegd voorspelde de theorie van Lorentz het nul-resultaat in eerste orde experimenten, maar dat ook in het Michelson-Morley experiment geen verschuiving werd gevonden was op zijn zachtst schokkend voor de laat 19e eeuwse natuurkunde. Voor een moderne lezer zou dit wellicht het moment zijn om de ether definitief te verwerpen, maar Lorentz was te diep overtuigd van het bestaan van een ether en vond een ultieme oplossing. Lorentz stelt dat de lengte van de arm die in de richting van de etherwind staat met een factor  $1 - \frac{v^2}{c^2}$  krimpt.[15] De belangrijkste beweegreden om deze krimp in te voeren is door te veronderstellen dat de moleculaire krachten die de vorm van een object bepalen werken met behulp van de ether. Door daarna te veronderstellen dat moleculaire en elektromagnetische krachten op dezelfde wijze invloed uitoefenen op materie wordt lengtecontractie plausibel. Was dit een desperate laatste poging om de ether theorie te redden of de gouden oplossing voor een langslepend probleem?

De impact van het Michelson-Morley experiment valt niet te onderschatten, het leidt tot de vreemdste paradoxen in de optica en de elektrodynamica. Lorentz introduceert een aantal begrippen die de grootste paradoxen op moet lossen, maar deze leiden, dat geeft hij zelf toe, tot een weliswaar consistent maar tegenintuïtieve theorie. Ik zal niet te veel ingaan op de wiskundige afleiding van de theorie van Lorentz, maar ik zal conceptueel

---

<sup>4</sup>Michelson en Morley was niet het enige tweedeorde experiment dat de elektronentheorie voor problemen stelde. Trouton-Noble is een minder bekend maar zeer interessant experiment. De oplossing die Lorentz aandraagt en de vergelijking met Einstein in het licht van dit experiment reiken te ver voor deze scriptie. Voor meer informatie verwijst ik naar de dissertatie van Michel Janssen[8]

proberen uit te leggen wat het resultaat is van Lorentz' aanpassingen en vooral hoe Lorentz uitkomt op de naar hem vernoemde invariantie.

### 3.7 Lorentz transformaties

Zoals eerder vermeld voert Lorentz lengtecontractie in als de laatste mogelijkheid om zijn ethertheorie te redden en om zijn theorie zowel het eerste als het tweede orde nulresultaat te laten verklaren. Het is nu tijd om deze theorie wat verder uit te diepen.

Net als in zijn hybride theorie stelt Lorentz een translatie op tussen twee coördinatenstelsels,  $x, y, z$  voor de ether in rust en  $x', y', z'$  meebewegend met het bewegende systeem. Deze translatie is in eerste instantie een Galileo transformatie, daarna wordt er nog een transformatie uitgevoerd, deze verandert de coördinaten op een wijze dat de golfvergelijkingen die uit de Maxwellvergelijkingen volgen ongewijzigd blijven. Voor Lorentz was dit stelsel,  $Q'$ , een fictief stelsel. Nuttig om elektrodynamische problemen terug te reduceren tot elektrostatische problemen, maar niet fysisch realistisch. De vorm van deze laatste transformatie kent bij Lorentz verschillende stadia. De transformatie die ook de contractie meeneemt laat de vrijwel complete invariantie van de Maxwell vergelijkingen zien.<sup>5</sup>  $\gamma$  is in dit geval  $\frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$ .

$$x' = \gamma x^* \quad (1)$$

$$y' = y \quad (2)$$

$$z' = z \quad (3)$$

$$t' = \gamma(t - \frac{v}{c^2}x) \quad (4)$$

Aanvankelijk voert Lorentz een grootheid  $l$  in, een numerieke coëfficiënt die afhankelijk is van de translatiesnelheid en 1 is als  $w = 0$ .  $x^*$  is in dit geval de normale Galileo transformatie  $x - vt$ . Wat opvallender is, is de uitdrukking voor  $t'$ . Was niet sinds Newton de tijd een onafhankelijke op zichzelf staande entiteit? Voor Lorentz is ook deze stap slechts instrumenteel. Hij voert deze lokale tijd in als wiskundig hulpmiddel. Onder andere Poincarè zal later wijzen op een andere interpretatie van deze lokale tijd en het zelfs 'Lorentz meest ingenieuze idee' noemen.

### 3.8 Lorentz invariantie

Doordat de theorie van Lorentz verklaart waarom er op aarde geen eerste en tweede orde afwijkingen van een stelsel in rust worden waargenomen maakt hij het snelheidsverschil vrijwel ondetecteerbaar. De aarde beweegt dus door de ether, maar de relatieve snelheid tussen de aarde en de ether is ondetecteerbaar. Aanvankelijk stelt Lorentz dat de velden in het ruststelsel van de ether de echte velden zijn en dat de velden in het meebewegende stelsel slechts hulpmiddelen zijn. Hoe valt dit te onderbouwen als er geen verschil

---

<sup>5</sup>Lorentz zag over het hoofd dat de lading  $\rho$  niet hetzelfde is in een ander inertiaalstelsel. Als hij dit wel had meegenomen zouden de Maxwell vergelijkingen compleet invariant zijn geweest.

gemeten kan worden tussen het reële en het fictieve veld en welk veld meet men dan werkelijk? Een belangrijk punt hier is het onderscheid tussen de Maxwell vergelijkingen zelf en de krachten die de velden veroorzaken. Als men de transformaties doorvoert zal men zien dat in het ene stelsel een verschijnsel van magnetische aard is, terwijl het in het andere stelsel een elektrisch effect is. Dit zal later het startpunt zijn voor Einstein.

Ik ben er hier niet op uit om te laten zien dat Lorentz de speciale relativiteitstheorie zelf al heeft ontwikkeld. Lorentz had een fundamenteel andere notie van zijn transformaties dan Einstein. Wel is het belangrijk in te zien dat er in de theorie van Lorentz ruimte ligt voor een andere interpretatie. Een waar Lorentz zelf na 1905 ook op ingaat, maar daar komen we later over te spreken.

## 4 Einsteins speciale relativiteitstheorie

It is known that Maxwell's electrodynamics—as usually understood at the present time—when applied to moving bodies, leads to asymmetries which do not appear to be inherent in the phenomena. Take, for example, the reciprocal electrodynamic action of a magnet and a conductor. The observable phenomenon here depends only on the relative motion of the conductor and the magnet, whereas the customary view draws a sharp distinction between the two cases in which either the one or the other of these bodies is in motion. For if the magnet is in motion and the conductor at rest, there arises in the neighbourhood of the magnet an electric field with a certain definite energy, producing a current at the places where parts of the conductor are situated. But if the magnet is stationary and the conductor in motion, no electric field arises in the neighbourhood of the magnet. In the conductor, however, we find an electromotive force, to which in itself there is no corresponding energy, but which gives rise—assuming equality of relative motion in the two cases discussed—to electric currents of the same path and intensity as those produced by the electric forces in the former case.[5]

Je zou kunnen stellen dat Einstein zich op een ander niveau met natuurkundige theorieën bezighield dan al zijn voorgangers. Hij ontwikkelde een zeer sterke intuïtie over hoe de natuurkunde in elkaar zou moeten zitten en liet zijn opvattingen niet door het eerste het beste experiment omver werpen. De manier waarop hij zijn artikel over de elektrodynamica begint is daarom tekenend. Einstein vraagt zich af waar deze asymmetrie vandaan komt en is deze wel natuurlijk? Is het logisch dat in het ene stelsel een verschijnsel elektrisch is en in het andere magnetisch of is dat een tekortkoming van de theorie?

### 4.1 Een magnetisch of elektrisch verschijnsel?

Als eerste zou ik met een voorbeeld deze asymmetrie die Einstein in zijn openingsparagraaf van 'On the Electrodynamics of Moving Bodies' noemt wat verder willen uitwerken. Ik gebruik hierbij een voorbeeld van Föppl waar Einstein zo goed als zeker van op de

hoogte was. Neem het volgende gedachtenexperiment. Een magneet beweegt met een snelheid  $v$  langs een geleidende ring. De richting van het magneetveld is zo gekozen dat het loodrecht op de ring staat. (hier volgt nog een afbeelding van) Volgens de theorie van Lorentz zou de ring in rust zijn ten opzichte van de ether. Uit de Maxwellvergelijkingen na enig gereken dat het elektrisch veld dat ontstaat door de beweging van het magneetveld gelijk een elektromotorische kracht oplevert, dit wordt Faraday inductie genoemd:

$$\epsilon_1 = \oint B \times (v/c) \cdot dl = (v/c)Ba$$

Waar  $a$  de diameter van de ring is. Vervolgens beweegt niet de magneet, maar de ring met een snelheid  $-v$ . In Lorentz' termen is de magneet in rust ten opzichte van de ether. Nu ontstaat er een Lorentzkracht en geen elektrisch veld. Het resultaat blijft daarentegen hetzelfde [19]

$$\epsilon_2 = \oint (-v/c) \times B \cdot dl = (v/c)Ba$$

Als een waarnemer in het eerste experiment meebeweegt met de magneet zal hij concluderen dat de kracht die hij waarneemt een magnetische oorsprong heeft. In Lorentz ogen is dit een verkeerde conclusie, de waarnemer is niet in rust ten opzichte van de ether en kan daarom geen geldige uitspraak doen. Het feit dat uit beide interpretaties dezelfde uitkomst volgt is voor Lorentz grotendeels toeval.

Einstein vindt er in de eerste paragrafen geen doekjes om. De asymmetrie lijkt hem geen deel van de natuur uit te maken. Einstein ziet in dergelijke voorbeelden samen met de opeenstapeling van nul-experimenten een gegronde reden om afscheid te nemen van een absoluut rustframe. In de optica en elektrodynamica is al laten zien dat er tot op eerste orde geen verschil tussen de inertiaalstelsels meetbaar is. Galileo liet al zien dat in de mechanica de wetten invariant zijn onder translatie.<sup>6</sup>

## 4.2 Het relativiteitspostulaat

In het artikel liggen de kaarten al vrij snel op tafel. Einstein ontvouwt zijn twee postulaten en spendeert de rest van zijn artikel aan een wiskundige uitwerking van deze postulaten. De deductieve methode van Einstein leidt er toe dat de vernieuwende concepten het beginpunt zijn in plaats van een moeizaam verkregen conclusie. Het eerste postulaat luidt als volgt:

The laws by which the states of physical system undergo changes are independent of whether these changes of state are referred to one or the other of two coordinate systems moving relatively to each other in uniform translational motion.

---

<sup>6</sup>Weliswaar zijn deze Galileo invariant en niet Lorentz invariant, maar we zullen zien dat Lorentz invariantie op lage snelheid versimpelt tot Galileo invariantie.

Laten we even achterover leunen en ons bedenken wat Einstein hier van tafel veegt. Einstein verklaart alle nul-experimenten die in de afgelopen twee hoofdstukken naar voren zijn gekomen. Het idee van Newton van een absolute ruimte is onverenigbaar met het relativiteitspostulaat. Het relativiteitsprincipe van Galileo voor de mechanica wordt door Einstein uitgebreid voor de gehele fysica. Ook op een meer conceptueel niveau verandert er iets. Voor veel tijdgenoten van Einstein was het noodzakelijk dat licht als golf door een medium dient te worden voortgeplant. Het complete draagvlak voor dit medium, de ether, valt weg.<sup>7</sup> Toch is, vanuit een ander perspectief, dit postulaat van Einstein niet geheel verrassend. In zekere zin is het de voltrekking van een proces dat al door Galileo is ingezet, namelijk de ondergang van een denkbeeld dat er speciale eigenschappen aan het stelsel van de waarnemer moeten worden toegedicht. Bij Aristoteles ziet men het verschil tussen aardse en bovenaardse beweging. Bij Kepler worden deze bewegingen weliswaar met elkaar verenigd, maar is nog altijd de zon het centrum van het universum. Lorentz vindt nog altijd dat er een rustframe moet zijn ten opzichte waarvan de beweging van de aarde meetbaar is. Tegen deze onderliggende gedachte zet Einstein zich met zijn Relativiteitspostulaat: een waarnemer die met constante snelheid door het zonnestelsel reist zal op geen wijze tegenwind of meewind van de ether kunnen waarnemen. Om elektromagnetische fenomenen goed te kunnen beschrijven heeft Einstein nog een aanname nodig: het lichtpostulaat.

Voordat ik verder ga zou ik graag een voor het werk van Einstein illustratief gedachtenexperiment bespreken. De zestienjarige Einstein stelt zich voor dat een bron in rust ten opzichte van de ether een lichtstraal uitzendt. Een waarnemer probeert vervolgens een zeker punt A op deze golf te pakken te krijgen en tegelijkertijd optische experimenten uit te voeren met licht van bronnen die ik in rust stonden ten opzichte van de ether. Als de waarnemer bijna dezelfde snelheid als de golf heeft veranderen de resultaten van zijn experimenten. Maar wat gebeurt er als de waarnemer dezelfde snelheid als de lichtstraal heeft? De experimenten die de waarnemer doet komen tot stilstand, het licht bereikt de spiegeltjes van de waarnemer niet meer. De Maxwell vergelijkingen laten geen staande elektromagnetische golven toe, toch sluiten ethertheorieën een dergelijk gedachtenexperiment niet uit. Einstein heeft hier een duidelijke intuïtie over.[20]

From the very beginning it appeared to me intuitively clear that, indeed from the standpoint of such an observer, everything would have to happen according to the same laws as for an observer who, relative to the earth, was at rest. For how, otherwise, should the first observer know, i.e., be able to determine, that he is in a state of fast uniform motion?[29]

Het is hier belangrijk in te zien dat Einstein niet op het niveau van resultaten van experimenten werkt en problemen probeert op te lossen, hij werkt via ingenieuze gedachtenexperimenten waarvan hij de hypothetische uitkomsten gebruikt om nieuwe inzichten te verkrijgen. Het relativiteitspostulaat van Einstein verklaart niet het falen van het meten van een variabele lichtsnelheid, maar hij stelt dat het een fundamentele eigenschap

---

<sup>7</sup>Tenminste, de klassieke notie van de ether valt weg, we zullen zien dat aangepaste theorieën, conceptueel gezien, aan het relativiteitspostulaat kunnen voldoen.

van ruimte is om in elk inertiaalstelsel homogeen en isotroop licht voort te planten.[21]

### 4.3 Het lichtpostulaat

We will introduce another postulate, which is only apparently irreconcilable with the former, namely, that light is always propagated in empty space with a definite velocity  $c$  which is independent of the state of motion of the emitting body.

In sommige leerboeken wordt het tweede postulaat van Einstein geponeerd als simpelweg: ‘de lichtsnelheid is constant.’ In werkelijkheid is het tweede postulaat iets subtieler, vandaar dat hij ook spreekt over een schijnbare onverenigbaarheid van beide postulaten. Einstein stelt dus dat de lichtsnelheid onafhankelijk is van de beweging van de bron. Dit postulaat lijkt voort te vloeien uit een soort van ether theorie. Onafhankelijk van de snelheid van de bron kan een lichtstraal zich slechts met de snelheid die het medium toelaat voortplanten. Einstein vraagt ons het lichtpostulaat niet op deze wijze te interpreteren, maar om het te combineren met het relativiteitspostulaat. Want ten opzichte waarvan heeft licht een ‘definite velocity’? Men zou geneigd zijn om te zeggen dat dit het frame is waarin de lege ruimte in rust is. Maar Einsteins eerste postulaat laat juist zien dat een dergelijk frame niet bestaat. Elke waarnemer kan zichzelf in rust wanen en zal observeren dat licht zich met een constante snelheid voortplant. Vandaar dat het lichtpostulaat soms voor het gemak vervangen wordt door dat van de constante lichtsnelheid. Door deze formulering te gebruiken komt het postulaat van Einstein minder uit de lucht vallen dan in sommige leerboeken wordt beschreven.

### 4.4 Synchroniseren van klokken

Einstein vervolgt zijn artikel met een passage over het synchroniseren van klokken. Als we willen rekenen met de twee eerder genoemde postulaten dan dienen we een begrip te hebben van het concept tijd en alle complicaties die het met zich mee brengt. Ook hier houdt Einstein een conceptuele toon aan en neemt de lezer mee in een gedachtenexperiment. Einstein benadrukt het verband tussen tijd en gelijktijdige gebeurtenissen:

If, for instance, I say. “The train arrives here at 7 o’clock,” I mean something like this: “The pointing of the small hand of my watch to 7 and the arrival of the train are simultaneous events.”

Dit geldt alleen voor gebeurtenissen in de nabijheid van de klok. Stel dat een waarnemer op punt A en een waarnemer op punt B elkaars klokken gelijk willen zetten, hoe kan dat in zijn werk gaan? Zonder volgende aanname komt men niet verder. Om gelijktijdigheid te kunnen definiëren dienen we aan te nemen dat de tijd dat het licht kost om van A naar B te komen even lang is als andersom. Deze aanname wordt gemakkelijk ondersteund door het lichtpostulaat van Einstein, maar met de vroege ethertheorieën verhoudt het zich natuurlijk veel moeilijker. Als een lichtstraal vanuit A op  $t_A$  naar B reist, op  $t_B$  in

B wordt gespiegeld naar A toe en op  $t'_A$  weer in A aankomt, dan moeten de volgende tijden aan elkaar gelijk zijn:

$$t_B - t_A = t'_A - t_B$$

Vanuit deze twee postulaten en de definitie van gelijktijdigheid is de complete speciale relativiteitstheorie af te leiden. Ik zal de precieze wiskundige afleiding van deze transformaties en de uitwerking van de speciale relativiteitstheorie achterwege laten. Einstein gebruikt een redelijk omslachtige methode voor zijn afleiding. In 1908 ontwikkelt Minkowski een vierdimensionale beschrijving van de speciale relativiteitstheorie die de theorie van Einstein eleganter maakt en duidelijk de verstrengeling van tijds- en ruimtecoördinaten laat zien. Deze afleiding is uitermate goed beschreven in verschillende leerboeken. Wat hier van belang is, zijn slechts de conceptuele uitgangspunten van deze theorie. Wat voor Einstein vaststaat is dat er geen voorkeursstelsel is, geen stelsel dat in rust verkeert ten opzichte van een ether of iets dergelijks. Als men met deze opvatting in het achterhoofd de Lorentz transformaties afleidt, ziet men dat de lokale tijd die Lorentz als fictief hulpmiddel aanneemt voor Einstein juist de echte tijd is. Voor Einstein is er geen absolute tijd omdat de tijd afhangt van het inertiaalstelsel en er is immers geen voorkeursstelsel. Ook uit de deductieve methode van Einstein volgt de invariantie van de Maxwell vergelijkingen. Einstein interpreteert dit echter veel fundamenteeler dan Lorentz dat doet. Bij Lorentz is de invariantie een soort van gelukkige uitkomst, terwijl het voor Einstein een essentieel gevolg van zijn postulaten is.

## 5 Vergelijking van beide theorieën

Allereerst wil ik een korte samenvatting geven van wat er de afgelopen hoofdstukken heeft voorgevallen. In 1895 publiceert Lorentz zijn ‘Versuch einer Theorie der elektrischen und optischen Erscheinungen in bewegten Körpern.’ Hoewel Lorentz daarvoor en daarna over het zelfde onderwerp blijft publiceren geeft dit artikel goed het project van Lorentz weer: een theorie vinden die elektrische en optische verschijnselen in een ten opzichte van de ether bewegend systeem kan beschrijven. Deze theorie is van groot belang omdat de aarde ook door de ether heen beweegt en dus kunnen optische en elektromagnetische experimenten op aarde alleen correct worden verklaard door te verwijzen naar de snelheid ten opzichte van de ether. Lorentz blijft aan zijn theorie schaven om deze in overeenstemming te brengen met verschillende experimenten. In eerste instantie kan hij alleen eerste orde experimenten verklaren, maar later ook tweede orde experimenten zoals het Michelson-Morley-experiment. Lorentz weet elektrodynamische problemen te transformeren naar elektrostatische. Voor hem zijn de elektrostatische velden die bij deze transformatie ontstaan fictieve velden waarin een lokale tijd geldt. Ze zijn niet fysisch reëel, maar slechts mathematische hulpgrepen om elektrodynamische problemen mee op te lossen. Lorentz zal na 1905 door blijven werken aan zijn ethertheorie en deze met enkele veranderingen in volkomen observationele equivalentie brengen met de speciale relativiteitstheorie. Lorentz komt er dus op uit dat de natuurwetten invariant zijn onafhankelijk van de relatieve snelheid ten opzichte van de ether, deze conclusie

maakt de detectie van een ether vrijwel onmogelijk, we zullen later zien wat dit voor de ethertheorie betekent.

In 1905 komt Einstein met zijn artikel *On the electrodynamics of moving bodies*. Alereerst verzet hij zich tegen twee eigenaardigheden in de natuurkunde. Ten eerste het feit dat hoewel in het ene geval een verschijnsel elektrisch wordt genoemd en in het andere geval magnetisch, terwijl dit onderscheid in de verschijnselen niet zichtbaar is. De uitkomsten van de berekeningen zijn in beide gevallen hetzelfde, maar de interpretatie hangt af van welk onderdeel van de opstelling in rust is ten opzichte van de ether. Voor Einstein is dit onbevredigend. Een andere probleem is het nulresultaat in verschillende experimenten. Einstein is ten dele op de hoogte van het werk van Lorentz. Hij heeft het *Versuch* gelezen, maar is waarschijnlijk niet op de hoogte van het latere werk. Hij was er dan ook van op de hoogte dat Lorentz het Michelson-Morley-experiment kon verklaren. Zijn probleem met de theorie van Lorentz lag dan ook meer in de eerdergenoemde asymmetrie. [22]

Einstein stelt dus twee postulaten op die weliswaar geïnspireerd zijn op in zijn ogen problemen binnen de natuurkunde, maar niet direct in de empirie gegrond zijn: het relativiteitspostulaat en het lichtpostulaat. Met deze twee postulaten komt hij tot lengtecontractie, tijdsdilatatie en de Lorentztransformaties. Als men de twee postulaten van Einstein aanneemt volgt de rest van de relativiteitstheorie als natuurlijke eigenschappen van ruimte en tijd.

In het vervolg van dit hoofdstuk zal ik eerst een beeld schetsen van de historische ontwikkelingen tussen de twee concurrerende theorieën, vervolgens zal ik proberen wetenschapsfilosofische labels op deze ontwikkelingen te plakken en laten zien in hoeverre deze labels overeenkomen met de werkelijkheid en waar ze in gebreke blijven.

### 5.1 Vroege ontvangst van de relativiteitstheorie (1905-1911)

De Duitse natuurkundige Walter Kaufmann bestudeert in het begin van de 20e eeuw de snelheidsafhankelijkheid van massa. Hij probeert daarin te differentiëren tussen de theorie van Max Abraham, die het elektron voorstelt als een starre harde bol met een uniforme ladingsverdeling en de 'Lorentz-Einstein' theorie waarin het elektron onderhevig is aan lengtecontractie en dus deformeerbaar is. Opvallend is dat vanwege de observationele equivalentie geen onderscheid gemaakt wordt tussen de theorie van Einstein en die van Lorentz. Kaufmann verwijst naar de 'Lorentz-Einstein' theorie.

Kaufmanns eigen experiment wijst volgens hemzelf uit dat Abrahams theorie overeenkomt met de verkregen resultaten en die van Lorentz-Einstein niet. Ik zal hier de lezer de details van de analyse van Kaufmann besparen, een grondige analyse van de resultaten kan worden gevonden in Miller.[23]

In het jaar daarop onderscheidt Kaufman wel Lorentz' theorie en Einsteins theorie. Kaufmann ziet epistemologische moeilijkheden in de theorie van Lorentz zoals bijvoorbeeld het feit dat Lorentz moet stellen dat de vaste sterren in rust zijn ten opzichte van de ether terwijl daar geen a priori reden voor is. Ook de Lorentz transformatie zelf is binnen de theorie van Lorentz een aanname. De discussie bevindt zich dus op een niveau van een zekere mate van elegantie en eenvoudigheid. Door de observationele equivalen-



tie kan geen enkel experiment een onderscheid maken tussen Lorentz' en een Einsteins theorie.

## 5.2 Reacties op Kaufmann

In 1905 was Einstein 26 jaar oud en Lorentz 52, twee keer zo oud. Behalve dat hun theorieën, behalve op de uiteindelijke implicaties, op zeer veel vlakken verschillen zijn het ook verschillende persoonlijkheden. Lorentz die rustig jarenlang aan zijn theorie schaaft om hem met de experimenten overeen te laten komen, terwijl Einstein binnen een jaar met drie wereldschokkende artikelen komt die het natuurkundige landschap de volgende eeuw zullen bepalen. We hebben net gezien dat Lorentz en Einstein door Kaufmann samen werden afgeserveerd omdat hun voorspellingen niet overeen kwamen met het experiment van Kaufmann. Beiden hebben hier op geheel andere wijze op gereageerd. Laten we eerst de reactie van Lorentz nemen:

Unfortunately my hypothesis of the flattening of electrons is in contradiction with Kaufmann's new results, and I must abandon it. I am, therefore, at the end of my Latin. It seems to be impossible to establish a theory that demands the complete absence of an influence of translation on the phenomena of electricity and optics. I would be very happy if you would succeed in clarifying the difficulties which arise again.<sup>8</sup>

Einstein heeft daarentegen een compleet andere reactie:

The theories of the electron's motion of Abraham and Bucherer [agree better with Kaufmann's data] than the relativity theory. In my opinion both theories have a rather small probability, because their fundamental assumption concerning the mass of moving electrons are not explainable in terms of theoretical systems which embrace a greater complex of phenomena.[25]

Het verschil in toon is treffend. Lorentz laat zich door één experiment zijn hele levenswerk afpakken. Einstein daarentegen stelt dat Abraham en Bucherer, een Duitse natuurkundige die een soortgelijke theorie als Abraham ontwikkelde, weliswaar het gedrag van een elektron goed kunnen beschrijven, maar dat ze zolang ze geen groter raamwerk hebben waar ze hun elektronentheorie in kunnen corporeren nooit de relativiteitstheorie omver kunnen werpen.

Nog exemplarischer voor Lorentz is het feit dat hij, als de epistemologische voordelen van Einsteins theorie duidelijk worden, weigert zijn eigen ethertheorie op te geven. Lorentz zal zijn hele leven de relativiteitstheorie blijven bekritisieren en zijn zwakke punten blijven blootleggen. Voor Lorentz is het onbegrijpelijk dat een vacuum zoals Einstein dat voor zich ziet toch energie kan bevatten. Wat is het dan dat die energie bevat?

Lorentz is met deze opstelling misschien exemplarisch voor de natuurkundigen van zijn tijd. Natuurkundige theoriën worden vanuit de experimenten geconstrueerd, natuurlijk geholpen of gehinderd door een intuïtie over hoe de wereld in elkaar dient te

---

<sup>8</sup>Brief uit maart 1906 van Lorentz aan Henri Poincaré[24]

zitten, zoals hopelijk in de afgelopen hoofdstukken duidelijk is geworden. De klassieke gang van zaken om eerst een fenomeen te beschrijven en daarna een verklaring te geven wordt door Einstein omgedraaid. Hij stelt een theorie op die specifiek voorspellingen voor experimenten levert.[2] Met deze aanpak zet Einstein een trend in de theoretische natuurkunde. De invloedrijke wetenschapsfilosof Karl Popper ziet in Einstein een grote inspiratiebron. Popper gaat zelfs zover dat hij zegt dat ‘zijn wetenschapsopvatting feitelijk een filosofische uitwerking is van de houding die Einstein ten aanzien van zijn theorie toonde’[6]

### 5.3 Een wetenschapsfilosofisch vergelijk

In zijn klassieke werk *The structure of scientific revolution* beschrijft Thomas Kuhn het stereotype wetenschappelijke revolutie. Volgens hem bevinden wetenschappers zich altijd binnen een paradigma, een denk- en begrippenkader waarbinnen de wetenschap de haar gestelde vragen kan beantwoorden. Als een wetenschap niet langer in staat is een aantal vragen bevredigend te beantwoorden of, in dit geval, experimenten te verklaren, raakt de wetenschap in een crisis. Een wetenschap kan uit de crisis raken doordat op eniger wijze wetenschappers buiten het paradigma een oplossing vinden. Een nieuw paradigma kan worden gevormd. Dit nieuwe denkkader kan andere vragen beantwoorden en de wetenschap verder brengen dan het vorige paradigma. Voor Kuhn is het belangrijk dat dit paradigma niet alleen maar de ideeënwereld van de wetenschapper is, maar echt een wezenlijk ander denkkader. Twee wetenschappers in een verschillend paradigma kunnen elkaar niet wezenlijk begrijpen omdat alles wat de ander zegt in het eigen denkkader moet worden geplaatst.

Deze sociohistorische benadering van wetenschappelijke verandering is vrij intuïtief en wellicht te vergelijken met problemen in het dagelijks leven. Een probleem waar je al dagen op vastloopt kan ineens door iemand met een frisse blik worden opgelost. Kuhn bedoelt deze paradigmaverandering veel fundamenteeler. Het gevaar van een dergelijke algemene beschrijving van wetenschappelijke revolutie is dat wetenschapshistorie met een Kuhnianse bril de feiten zo kan interpreteren dat het een paradigmaverandering betreft, maar dat bij nader inzien de feiten helemaal niet zo zwart-wit gesteld kunnen worden.

De opkomst van de speciale relativiteitstheorie wordt vaak gezien als een typische paradigmaverschuiving. Lorentz en zijn tijdsgenoten werkten aan een ethertheorie die de eerste orde resultaten kon verklaren. De experimenten van Michelson en Morley deden de natuurkunde in een crisis belanden en Einstein vestigde met zijn speciale relativiteitstheorie een nieuw paradigma.

Ik hoop dat ik in de afgelopen hoofdstukken heb kunnen laten zien dat de situatie subtieler ligt dan bovenstaande gechargeerde passage. Lorentz had wel degelijk een antwoord op Michelson-Morley, alleen moest hij er lengtecontractie voor invoeren zonder duidelijke verklaring. Ook het feit dat Kaufmann in eerste instantie geen onderscheid maakt tussen Einsteins en Lorentz’ theorie wijst aan dat de overgang lang niet zo abrupt was als Kuhn ons wil doen geloven. Wat echter wel interessant is aan de Kuhnianse theorie is het feit dat verschillende paradigmas elkaar uitsluiten. Tot op het eind van zijn

dagen zal Lorentz op de verschillen wijzen tussen zijn theorie en die van Einstein. Zijn bezwaren zijn van conceptuele aard en in dat opzicht kan het niet treffender: wiskundig gezien zijn ze het compleet met elkaar eens, de formalismen zijn identiek, maar het raamwerk waaraan ze hun theorie bevestigen, de achterliggende concepten, zijn radicaal anders. Zo vulden Einstein en Lorentz elkaar weliswaar aan, maar zullen ze elkaar nooit helemaal begrepen hebben.

Kuhn gelooft dat bij een wetenschappelijke revolutie de wetenschappelijke wereld op basis van inhoud en argumenten geleidelijk de overstap maakt naar het nieuwe paradigma, de praktijk wijst echter anders uit. In deze context wil ik graag besluiten met een citaat van Max Planck:

A new scientific truth does not triumph by convincing its opponents and making them see the light, but rather because its opponents eventually die, and a new generation grows up that is familiar with it. [28]

## 6 Conclusie

Het is verleidelijk een wetenschapper neer te zetten als een product van zijn eigen tijd en een zekere onvermijdelijkheid in zijn werk te laten zien. Als hij er niet geweest was, had een ander de ontdekking gedaan. Aan de andere kant kan je een wetenschapper ook niet geheel los van de geschiedenis en van zijn omgeving zien. Ik heb geprobeerd in deze scriptie een evenwichtig beeld te schetsen van de ontwikkelingen van de elektrodynamica aan het eind van de 19e en het begin van de 20e eeuw. Het is aan de lezer om een waardeoordeel te geven aan het werk van Lorentz en van Einstein. Het is zeer moeilijk in te schatten in hoeverre het werk van Lorentz bepalend is geweest voor de speciale relativiteitstheorie van Einstein. Lorentz vormde zeker een opmaat voor Einstein en had zo goed als dezelfde formalismen als Einstein later zou hebben, maar conceptueel gezien is Einsteins werk zo radicaal anders dat men niet kan stellen dat Lorentz het goud al zelf in handen had. Ik heb geprobeerd Lorentz te gronden in een lange wetenschappelijke traditie en ook de historische waarde van de ethertheorie aan te tonen. Het gemak waarmee Lorentz als een relikwie van de oude wetenschap in crisis wordt neergezet vindt niet zijn oorsprong in een feitelijke historische benadering en is niet terecht. Het mag wellicht van pedagogisch belang zijn om een duidelijke paradigmaverandering tussen de klassieke fysica van Lorentz en de relativiteitstheorie van Einstein neer te zetten. Het neerzetten van het experiment van Michelson-Morley als cruciale test voor de klassieke theorie valt in pedagogisch opzicht ook te begrijpen. Maar ik hoop inzichtelijk te hebben gemaakt dat de overgang tussen de klassieke fysica en de relativiteitstheorie een stuk stubtieler ligt dan vaak wordt gepresenteerd.

Historisch besef voor een wetenschapper is niet alleen nodig uit eerbied voor het verleden, maar kan wel degelijk van belang zijn in de hedendaagse wetenschap. Alleen al het feit te weten dat met dezelfde overtuiging waarmee je de relativiteitstheorie of de quantummechanica verdedigt in het verleden mensen de platheid van de aarde of een deeltjestheorie van licht verdedigden kan helpen je eigen denkbeelden te relativiseren en

kritischer de bestaande theorie onder de loep te nemen. De tijd dat een leraar een student afraadt natuurkunde te studeren omdat het vak af zou zijn lijkt definitief voorbij. Maar of de natuurkunde ooit nog zo radicaal verandert als in het begin van de 20e eeuw.... De toekomst zal het leren.

## Referenties

- [1] Aristotle. *Physics, Book 1, Chapter 1*. 2007.
- [2] Silvio Bergia. *Einstein, Kwanta en relativiteit: revolutie in de natuurkunde*, page 47. Natuur en Techniek, 2002.
- [3] Stillman Drake, editor. *Discoveries and Opinions of Galileo*, pages 113–114. Doubleday Anchor Books, 1957.
- [4] Stillman Drake. Galileo and the law of inertia. *American Journal of Physics*, 32(8):601–608, 1964.
- [5] Albert Einstein. On the electrodynamics of moving bodies. *Annalen der Physik*, 1905.
- [6] Michiel Leezenberg en Gerard de Vries. *Wetenschapsfilosofie voor geesteswetenschappen*, page 73. Amsterdam University Press, 2001.
- [7] Galileo Galilei. *Dialogue Concerning the Two Chief World Systems*. University of California Press, 1953.
- [8] Michel Janssen. *A comparasion between Lorentz’s ether theory and special relativity in the light of the experiments of Trouton and Noble*. PhD thesis, University of Pittsburgh, 1995.
- [9] Thomas S. Kuhn. *The Copernican Revolution*, pages 68–71. Harvard University Press, 1957.
- [10] Thomas S. Kuhn. *The Copernican Revolution*, pages 146–147, 167–169. Harvard University Press, 1957.
- [11] Hendrik Antoon Lorentz. *The Theory of Electrons*. Dover Publications, Inc., 1952.
- [12] Hendrik Antoon Lorentz. *The Theory of Electrons*, page 176. Dover Publications, Inc., 1952.
- [13] Hendrik Antoon Lorentz. *The Theory of Electrons*, pages 315–316. Dover Publications, Inc., 1952.
- [14] Hendrik Antoon Lorentz. *The Theory of Electrons*, page 174. Dover Publications, Inc., 1952.
- [15] Hendrik Antoon Lorentz. *The Theory of Electrons*, pages 195–196. Dover Publications, Inc., 1952.
- [16] Luther. *Tablebook*. The Lutheran Publication Society.
- [17] James Clerk Maxwell. A dynamical theory of the electromagnetic field. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 155:499, 1865.

## REFERENCES

---

- [18] Arthur I. Miller. *Albert Einstein's Special Theory of Relativity*, pages 16–17. Addison-Wesley Publishing Company Inc., 1981.
- [19] Arthur I. Miller. *Albert Einstein's Special Theory of Relativity*, pages 146–149. Addison-Wesley Publishing Company Inc., 1981.
- [20] Arthur I. Miller. *Albert Einstein's Special Theory of Relativity*, pages 167–169. Addison-Wesley Publishing Company Inc., 1981.
- [21] Arthur I. Miller. *Albert Einstein's Special Theory of Relativity*, page 170. Addison-Wesley Publishing Company Inc., 1981.
- [22] Arthur I. Miller. *Albert Einstein's Special Theory of Relativity*, pages 87–89. Addison-Wesley Publishing Company Inc., 1981.
- [23] Arthur I. Miller. *Albert Einstein's Special Theory of Relativity*, pages 225–232. Addison-Wesley Publishing Company Inc., 1981.
- [24] Arthur I. Miller. *Albert Einstein's Special Theory of Relativity*, page 334. Addison-Wesley Publishing Company Inc., 1981.
- [25] Arthur I. Miller. *Albert Einstein's Special Theory of Relativity*, page 341. Addison-Wesley Publishing Company Inc., 1981.
- [26] Isaac Newton. *Principia Mathematica*. 1794.
- [27] Isaac Newton. *Principia Mathematica*. 1794.
- [28] Max Planck. *Scientific Autobiography and Other Papers*. F. Gaynor, New York, 1949.
- [29] Paul Arthur Schilpp, editor. *Autobiographical Notes*, volume Albert Einstein: Philosopher-Scientist. 1946.
- [30] Edmund Whittaker. *A History of the Theories of Aether and Electricity*, volume 1, pages 20–28. Humanities Press New York, 1973.
- [31] Edmund Whittaker. *A History of the Theories of Aether and Electricity*, volume 1, pages 16–20. Humanities Press New York, 1973.
- [32] Edmund Whittaker. *A History of the Theories of Aether and Electricity*, volume 1, page 20. Humanities Press New York, 1973.
- [33] Edmund Whittaker. *A History of the Theories of Aether and Electricity*, volume 1, pages 100–101. Humanities Press New York, 1973.
- [34] Edmund Whittaker. *A History of the Theories of Aether and Electricity*, volume 1, pages 94–95. Humanities Press New York, 1973.

## REFERENCES

---

- [35] Edmund Whittaker. *A History of the Theories of Aether and Electricity*, volume 1, pages 386–387. Humanities Press New York, 1973.
- [36] Edmund Whittaker. *A History of the Theories of Aether and Electricity*, volume 1, page 387. Humanities Press New York, 1973.