

Een vijfde Galilei

Een comparatieve studie naar de functie van experimenten in Galileo Galilei's *Discorsi* en de historiografie over de Wetenschappelijke Revolutie

S.C.J.R. Broere
Onderzoeksseminar III
Visies op de Wetenschappelijke Revolutie
Prof. dr. H.F. Cohen
23 januari 2013

Inhoudsopgave

Introductie	3
§1 Viermaal een Wetenschappelijke Revolutie	5
§2 Viermaal Galilei	8
§2.1 Cohens Galilei: Conceptueel en methodisch revolutionair	8
§2.2 Vermij's Galilei: Baanbreker van een Cartesiaans universum	10
§2.3 Henry's Galilei: Begiftigd bepleiter van realistische wiskunde	12
§2.4 McClellan en Dorns Galilei: Conceptueel revolutionair	13
§3 Galilei's experimenten	15
§3.1 Dag één: Het ledig, de lucht en vallende objecten	17
§3.2 Dag drie: Afstand en natuurlijke eenparige versnelling	19
§4 Wiskunde en werkelijkheid. Een vijfde Galilei?	22
§4.1 Galilei's experimenten geanalyseerd	23
§4.2 Galilei en de historici	25
§5 Conclusie. Een vijfde Galilei	29
Geraadpleegde literatuur & Illustratieverantwoording	33

Een vijfde Galilei

Dat Galileo Galilei (1564-1642) een prominente positie inneemt in de geschiedenis van de natuurwetenschap, zal door weinig wetenschapshistoricus worden ontkend. Niet alleen betekende de publicatie van zijn *Sidereus nuncius* (1610) een doeltreffende aanval op het Aristotelische onderscheid tussen het boven- en ondermaanse, ook de publicaties van de *Dialogo* (1632) en de *Discorsi* (1638) hebben elk op eigen wijze significant bijgedragen aan de transformatie van het oude, Aristotelische wereldbeeld en een daarmee samenhangende benadering van de natuur, in een moderne, of in ieder geval meer moderne conceptie van universum en natuuronderzoek. Hoe zijn werk en leven echter precies gepositioneerd moet worden in dit transformatieproces, algemeen aangeduid als de Wetenschappelijke Revolutie, daarover verschillen de historici van inzichten.

Omstreeks 1610 begon Galilei's ster als natuuronderzoeker te rijzen. Door *Sidereus nuncius* op te dragen aan de groothertog van Toscane, Cosimo II de Medici, en bovendien de vier door Galilei ontdekte manen van Jupiter te kerstenen tot de Mediceïsche sterren, wist Galilei zijn aanstelling als professor wiskunde aan de Universiteit van Padua te verruilen voor een bestaan als hoofd 'wiskundige en filosoof' aan het hof van de Medici. Vanuit deze positie kon hij in discussie treden met de verdedigers van de leer van Aristoteles en in het specifiek de Aristotelische kosmologie, een geschiedenis die vele jaren overspant. De publicatie van de *Dialogo* in 1632, een ogenschijnlijk neutrale uiteenzetting van de wereldsystemen van Copernicus en Ptolemaeus, maar in werkelijkheid één lang, uitvoerig betoog in het voordeel van Copernicus' heliocentrisme, leidde een jaar later tot Galilei's veroordeling. Dat de aarde daadwerkelijk om de zon zou draaien was zowel in strijd met de Bijbel als met Aristoteles, wiens filosofie sinds Albertus Magnus en Thomas van Aquino met het christendom versmolten was. Galilei werd gedwongen publiekelijk Copernicus' leer af te zweren, waarna de inquisitie de inmiddels 69-jarige onder huisarrest plaatste. Dit weerhield hem er echter niet van zijn tweede grote werk, de *Discorsi*, te schrijven en publiceren, een werk dat door velen als Galilei's wetenschappelijke meesterwerk wordt beschouwd.¹

De *Discorsi*, of voluit *Discorsi e dimostrazioni matematiche, intorno a due nuove scienze*, verschilt inhoudelijk opvallend van de *Dialogo*. Hoewel beide werken zijn onderverdeeld in vier dagen waarop dezelfde personages met elkaar in gesprek zijn, verschillen zowel de karakters van deze personages alsmede de onderwerpen die zij bediscussiëren. De auteur keerde weder tot de theologisch en politiek non-controversiële thema's die hij onderzocht in de periode voor 1610, dus voordat hij verstrengeld raakte in wereldbeschouwelijke kwesties.² De Italiaan bleef daarbij weliswaar in discussie met Aristoteles, maar zijn toon is minder polemisch, sterker mathematisch.

¹ James E. McClellan III en Harold Dorn, *Science and technology in world history. An introduction* (Baltimore, 2006), 224.

² McClellan en Dorn, *Science and technology in world history*, 234.

Zoals uit de titel blijkt, introduceerde Galilei twee “nieuwe wetenschappen,” namelijk bewegingsleer en materiaalkunde. Daarnaast besprak hij vele andere fenomenen, waaronder condensatie, het gewicht van de lucht, de kracht van het ledig, de oneindigheid en de kracht van hefboomen. In al, zo niet in bijna al deze discussies nemen wiskundige bewijsvoering en experimentele beproeving een bijzondere positie in. Galilei’s kritiek naar zijn filosofische voorgangers is dat zij hun beweringen enerzijds niet zintuigelijk testte, anderzijds niet met de noodzakelijke mathematische bewijsvoering ondersteunden. Om deze redenen zijn de *Discorsi* zowel conceptueel als methodisch revolutionair te noemen.

Of toch niet? Hoe Galilei’s werk historisch geïnterpreteerd moet worden, daarover scheiden de wegen der historici. De plaats die experimenten innemen in zijn werk en bewijsvoering, en daarmee samenhangend de betekenis van Galilei’s experimenten in het grotere kader van de Wetenschappelijke Revolutie, zijn punten van discussie. In wat volgt zal ik vier geschiedkundige werken analyseren en vergelijken met betrekking tot de vraag welke plaats en functie, Galilei en zijn experimenten innemen in deze geschiedenissen, om deze vier historici vervolgens te spiegelen met Galilei’s *Discorsi*. De vier werken die ik hiervoor wil gebruiken zijn *De herschepping van de wereld* van Floris Cohen³, *The Scientific Revolution and the origins of modern science* van John Henry⁴, *Kleine geschiedenis van de wetenschap* van Rienk Vermij⁵, en *Science and technology in world history* van James E. McClellan III en Harold Dorn⁶. Mijn vergelijkende analyse zal aanvangen met een uiteenzetting van het concept ‘Wetenschappelijke Revolutie’ zoals vormgegeven in de vier zojuist genoemde werken, om vervolgens het denken en de methode van Galilei hierin te plaatsten. De betekenisvolle samenhang tussen geheel en component, dus tussen de Wetenschappelijke Revolutie en één van haar bewegers zal ik via deze weg inzichtelijk maken. Hierna zal ik de rol van het experiment in de *Discorsi* uiteenzetten, om deze reconstructie aansluitend te vergelijken met de eerder geanalyseerde historische werken. De vraag in hoeverre de vijf historici Galilei’s werk adequaat representeren staat hierbij centraal. In een appendix zal ik reflecteren over de aard van geschiedwetenschap en de vraagstelling of het gegeven dat vijf historici een meer of minder radicaal andere interpretatie kunnen geven van een historische gebeurtenis of personage, niet afbreuk doet aan het wetenschappelijke karakter van de geschiedwetenschap.

³ Floris Cohen, *De herschepping van de wereld. Het ontstaan van de moderne natuurwetenschap verklaard* (Amsterdam, 2008).

⁴ John Henry, *The Scientific Revolution and the origins of modern science* (Basingstoke / New York, 2008).

⁵ Rienk Vermij, *Kleine geschiedenis van de wetenschap* (Amsterdam, 2006).

⁶ James E. McClellan III en Harold Dorn, *Science and technology in world history. An introduction* (Baltimore, 2006).

§1 Viermaal een Wetenschappelijke Revolutie

De vijf wetenschapshistorici stemmen in ieder geval overeen dat er zoiets als een Wetenschappelijke Revolutie heeft plaatsgevonden. Dit op zichzelf is namelijk al punt van historisch debat. Harvard professor Steven Shapin is één van die historici die het bestaan van een Wetenschappelijke Revolutie van de hand wijst. Het concept zou namelijk te veel doen denken aan een 'coherente, cataclysmische en climactische gebeurtenis,' terwijl deze door nauwkeurige bestudering oplost in een verzameling losse gebeurtenissen en 'culturele praktijken.'⁷ In de door ons te analyseren werken wordt daarentegen met meer of minder woorden betoogd dat 'Wetenschappelijke Revolutie' een zinvol en bruikbaar concept is en in een genese van de moderne natuurwetenschap opgenomen dient te zijn. Cohen is daarbij het meest expliciet door de vraag te stellen wat een 'revolutie' is. Zijn antwoord luidt dat een gebeurtenis niet een revolutie *is*, maar dat een gebeurtenis in meer of mindere mate revolutionair is. Volgens Cohen is de maatstaf om de mate van revolutie te bepalen, de vraag in hoeverre een bijstaander een bepaalde ontwikkeling had kunnen voorspellen. Bij monde van een trendwachter aan het begin van zeventiende eeuw beargumenteert Cohen vervolgens dat de zeventiende-eeuwse transformaties in diverse vormen van natuurkennis grotendeels niet in het vooruitzicht lagen en dus met recht als revolutionair kunnen worden beschouwd.⁸ 'Diverse vormen van natuurkennis' dient benadrukt te worden. De Wetenschappelijke Revolutie wordt door al deze historici niet begrepen als een coherent gebeurtenis - 'één en ondeelbaar,' in de bewoording van Vermij⁹ -, maar een verzameling gebeurtenissen die elk in meer of mindere mate als revolutionair beschouwd kunnen worden. Henry verwoordt deze gedachte door te stellen dat 'Wetenschappelijke Revolutie' niet meer is dan 'a convenient term of reference for a wide range of major social and intellectual changes.'¹⁰ McClellan & Dorn geven blijk van eenzelfde standpunt door het concept 'Wetenschappelijke Revolutie' als 'a useful conceptual tool, setting the episode in a broader historical context as a complex and multifaceted phenomenon [...]' te kenmerken.¹¹ In tegenstelling tot sommige geschiedenissen, wordt in alle vier de werken het concept 'Wetenschappelijke Revolutie' gehanteerd.

Desalniettemin tekenen zich grote verschillen af. Hoe de Wetenschappelijke Revolutie begrepen wordt, hoe haar verloop wordt gekenschetst en hoe het ontstaan van de moderne wetenschap met deze periode in verband wordt gebracht zijn allemaal punten van contrast. Deze

⁷ Shapin, geciteerd in: Cohen, *De herschepping van de wereld*, 102.

⁸ *Ibid.*, 102-9; 261.

⁹ Vermij, *Kleine geschiedenis van de wetenschap*, 6.

¹⁰ Henry, *The Scientific Revolution*, 3.

¹¹ McClellan en Dorn, *Science and technology in world history*, 204.

vier uiteenlopende interpretaties van de Wetenschappelijke Revolutie zullen in de rest van deze paragraaf besproken worden.

Cohen plaatst de Wetenschappelijke Revolutie in de zeventiende eeuw en deelt deze op in een tweetal fases, elk bestaande uit een drietal revolutionaire transformaties in drie verschillende vormen van natuurkennis. Deze drie verschillende vormen van natuurkennis zijn: een Atheense variant, een kwalitatief-georiënteerde benadering van de natuurverschijnselen, gericht op het verklaren van de omringende werkelijkheid op basis van een beperkt aantal eerste beginselen; een Alexandrijnse variant, een kwantitatieve benadering van de wereld met als doel mathematisch beschrijving en abstrahering waar een vijftal waarnemingsfenomenen aanleiding tot gaven; en, tot slot, een empirisch-praktische variant, een waarneming-georiënteerde benadering van de natuur, met als ideaal het omzetten van nauwkeurige waarnemingen in praktische toepassing. Geen van deze vormen van natuurkennis verdient volgens Cohen het predicaat 'modern,' omdat zij niet gekenmerkt worden door de permanente dynamiek die zo eigen is aan de moderne natuurwetenschap. De mogelijkhedenvoorwaarden voor deze dynamiek werden pas gecreëerd tijdens de Wetenschappelijke Revolutie, nadat culturele transplantatie de kansen op radicale vernieuwing had vergroot. Een zestal revolutionaire transformaties resulteerden namelijk in een synthese tussen experiment en intellectualisme, waardoor 'de bouw, gevolgd door niet aflatende verbouwing, van kwantitatief georiënteerde modellen van de ervaringswerkelijkheid' mogelijk werd.¹² Diverse praktijken, zoals het experiment, werden ontwikkeld om uitspraken over de wereld te toetsen op hun realiteitswaarde. Hoewel de conceptuele omwentelingen tijdens de Wetenschappelijke Revolutie in Cohens werk zeker niet onbelicht blijven, dankt deze periode haar revolutionaire karakter bovenal aan methodologische transformaties.

Gelijk aan Cohen, plaatst Vermij de Wetenschappelijke Revolutie in de zeventiende eeuw, maar begrijpt haar bovenal als een conceptuele omwenteling. 'Natuurwetenschap,' schrijft hij, 'is geen vastomlijnd begrip. [In] verschillende perioden [hebben] de mensen verschillende wetenschappelijke idealen en doelstellingen [...] gekoesterd.'¹³ De hedendaagse vooronderstellingen die ten grondslag liggen aan het denken over natuur en wetenschap vinden volgens Vermij hun oorsprong in de zeventiende eeuw of, meer precies, in het denken van Galilei en René Descartes (1596-1650). Nadat in de zestiende eeuw het Aristotelische wereldbeeld langzaam maar zeker in discredit was gebracht, volgde een periode van onzekerheid welke plaats maakte voor een nieuw wereldbeeld. Dit wereldbeeld werd ontleend aan de filosofie van Descartes en omsloot een volgens vaste natuurwetten causaal gedetermineerd universum waarin materiedeeltjes bewegen, op elkaar stuiten en samenklonteren. Slechts de mens als denkende substantie is gevrijwaard van dit mechanische uurwerk. Volgens Vermij is het tegen de achtergrond van deze conceptie van het functioneren van de natuur, dat een nieuw

¹² Cohen, *De herschepping van de wereld*, 49.

¹³ Vermij, *Kleine geschiedenis van de wetenschap*, 2.

wetenschappelijk, experimenteel programma vorm kon krijgen. Descartes' totaalfilosofie nodigde uit tot vervolgonderzoek, en voorzag de natuuronderzoekers bovendien van nieuwe concepten om natuurprocessen te duiden.¹⁴

Henry vat de Wetenschappelijke Revolutie samen als de periode waarin 'the natural philosophy of the Middle Ages, which had tended to remain aloof from mathematical and more pragmatic or experiential arts and sciences, became amalgamated with these other approaches to the analysis of nature, to give rise to something much closer to our notion of science.'¹⁵ Volgens Henry voltrok dit proces zich tussen 1500 en 1700 en hij zoekt haar verklaring in sociale en culturele factoren. Allereerst tastte de ontdekking van andere antieke Griekse auteurs de autoriteit van Aristoteles aan. Onder invloed van het humanistische gedachtegoed groeide de overtuiging dat natuurkennis nuttig dient te zijn en de mensheid ten goede moet komen. Bovendien kwam de nadruk te liggen op eigen waarheidsbevinding. Deze culturele waarden leidden ertoe dat het aanzien van de wiskunde, de magie en andere praktische, experimentele tradities, disciplines die zich buiten de muren van de universiteit hadden ontplooid, steeg. Dankzij de ontwikkeling van Europese hoven in de richting van absolutistische staten, nam de sociale mobiliteit van deze praktisch georiënteerde vormen van natuurkennis toe. Eenmaal verbonden aan de hofhouding van deze of gene, nam het prestige van een onderzoeker toe waardoor deze in discussie kon treden met het universitaire Aristotelianisme, dat niet voldeed aan de nieuwe culturele waarden. Nieuwe natuur-onderzoekende methodes en een nieuwe conceptie van de natuur vloeiden voort uit deze discussie. Wiskunde en experiment werden sleutels tot het kennen van de natuur.

McClellan & Dorn wijzen net als de overige historici op het multidimensionale karakter van de Wetenschappelijke Revolutie, maar in hun bespreking van deze periode is het toch voornamelijk astronomie wat de klok slaat. Verklaring van de Revolutie wordt gezocht in technologische en sociale factoren. In hun wereldgeschiedenis van technologie en wetenschap betogen zij dat gezien vanuit historisch perspectief, technologie niet begrepen moet worden als toegepaste wetenschap, maar vaak juist de aanzet heeft gegeven tot ontwikkelingen in het natuuronderzoek. Zo ook de totstandkoming van de moderne natuurwetenschap tussen 1500 en 1700. In de kielzog van de Militaire Revolutie, een wende in militaire strategie en oorlogsvoering, ontstonden machtscentra zoals hoven en natie-staten die optraden als patronen van het natuuronderzoek. Dit systeem van patronage voorzag natuuronderzoekers van sociale en financiële steun in de hoop dat natuuronderzoek vrucht zou werpen. Vanuit deze 'new external conditions for science and natural philosophy' ontstonden genootschappen die zich ontwikkelden los van de universiteiten en een belangrijke factor bleken in het wordingsproces van de moderne natuurwetenschap.¹⁶ Nicolaus Copernicus (1473-1543) wordt aangewezen als de initiator van dit

¹⁴ *Ibid.*, 81-2.

¹⁵ Henry, *The Scientific Revolution*, 5-6.

¹⁶ McClellan en Dorn, *Science and technology in world history*, 182.

wordingsproces omdat hij, door radicaal te breken met het geocentrische wereldbeeld, verdere ontwikkelingen mogelijk maakte. De nieuwe wetenschap die ontstond poogde haar claims experimenteel te onderbouwen en haar ondervindingen helder en inzichtelijk te presenteren.

Alle vijf de historici beschouwen het werk van Newton als het culminatiepunt van de Wetenschappelijke Revolutie, hoewel Vermij daaraan toevoegt dat ‘het model van wetenschap dat Newton propageerde, [...] toch vooral een correctie en nadere invulling van dat van Descartes [was].’¹⁷ Geen van deze historici beargumenteert dat met de *Principia* een volwaardige moderne natuurwetenschap was ontstaan, maar eerder een vorm van natuurwetenschappelijk onderzoek die ook vandaag de dag nog als valide kan worden beschouwd. In dit paper zal ik de termen ‘natuuronderzoek’ en ‘natuur-onderzoekende praktijk’ hanteren om verwarring met de hedendaagse natuurwetenschappen te voorkomen.

Galilei of Newton, schrijft Cohen, ‘worden door een hedendaagse natuurwetenschapper begroet als vakgenoten - wat ouderwetse misschien, maar wel herkenbaar als vakgenoten.’¹⁸ Het wordt tijd na te gaan waarom Galilei dan precies als ouderwetse vakgenoot herkend zal worden.

§2 Viermaal Galilei

In de vorige paragraaf is uiteengezet hoe respectievelijk Cohen, Vermij, Henry en McClellan & Dorn de Wetenschappelijke Revolutie begrijpen. Hier zal het werk van Galilei geïnterpreteerd worden tegen de achtergrond van het vorige paragraaf, zodat duidelijk wordt welke positie Galilei inneemt in het geheel van de Wetenschappelijke Revolutie volgens deze vijf auteurs. Daar de nadruk in dit paper ligt op de *Discorsi* en de functie van het experiment in Galilei’s werk, is ervoor gekozen de gebeurtenissen in en rondom het jaar 1633 buiten beschouwing te laten. Een bespreking van Galilei’s veroordeling en hoe deze te interpreteren zou mijn analyse nodeloos compliceren. In wat volgt zullen de Galilei’s van Cohen, Vermij, Henry en McClellan & Dorn achtereenvolgens worden besproken.

§2.1 Cohens Galilei: conceptueel en methodisch revolutionair

Cohen deelt de Revolutie op in een zestal revolutionaire transformaties waarbij Galileo Galilei samen met Johannes Kepler (1571-1630) de hoofdrol in de eerste van deze zes transformaties speelt. Deze transformatie, die Cohen beschrijft als een omwenteling van ‘Alexandrië’ naar ‘Alexandrië-plus,’ behelsde zowel een verdieping als verbreding van de Alexandrijnse

¹⁷ Vermij, *Kleine geschiedenis van de wetenschap*, 100.

¹⁸ Cohen, *De herschepping van de wereld*, 271.

kennisstructuur. In het oude Alexandrië hadden vijf natuurfenomenen aanleiding geven tot wiskundige abstractie, namelijk de bewegingen van de hemellichamen en dwaalsterren, het breken van lichtstralen, consonante samenklanken en evenwichtstoestanden in vaste en vloeibare lichamen. Door de eeuwen heen waren hier geen nieuwe onderwerpen aan toegevoegd. Verbreding van de Alexandrijnse kennisstructuur betekent dat nieuwe natuurfenomenen aan wiskundige analyse onderworpen werden, waaronder val-, worp-, slingerbewegingen en de sterkte van materialen. Verdieping van de kennisstructuur houdt in dat door middel van het experiment wiskunde en werkelijkheid nauwer op elkaar betrokken werden. Ptolemaeus had in de eerste eeuw na Christus reeds gepoogd een brug te slaan tussen zijn wiskundige modellen en de natuurlijke wereld, maar echt succesvol waren de pogingen van hem en anderen niet geweest. Om deze twee redenen noemt Cohen het verschil tussen Alexandrië en Alexandrië-plus, dus tussen het werk van Kepler en Galilei en dat van hun voorgangers, 'spectaculair groot.'¹⁹

De historicus beschouwt als Galilei's allergrootste prestatie het 'ontwikkelen van een heel nieuw idee van beweging, dat dwars ingaat tegen wat de dagelijkse waarneming ons voorhoudt.'²⁰ Aristoteles' bewegingsbegrip was afkomstig uit de alledaagsheid: een voorwerp beweegt zolang er een bewegende kracht op uitgeoefend wordt, en een bewegend voorwerp beweegt zich in de richting van een specifiek doel. Daarbij is het onafhankelijk van omringende wereld en voorwerpen, beweging is absoluut. Galilei's relatieve conceptie van beweging was daarentegen ontsproten uit de abstracte wereld van de Alexandrijnen. Onder ideale omstandigheden heeft een bewegend voorwerp de neiging in zijn beweging te volharden, sinds Newton aangeduid als het traagheidsbeginsel, en dus beweegt een voorwerp niet in de richting van een specifiek doel. Bovendien beweegt een voorwerp slechts ten opzichte van andere voorwerpen en kan dus op eenzelfde moment verschillende bewegingen voltrekken. Aan de hand van dit bewegingsbegrip wist Galilei tegenwerpingen tegen Copernicus' wereldbeeld te ontkrachten en op het eeuwenoude probleem van de valversnelling nieuw licht te werpen.

Galilei's verdieping van de Alexandrijnse kennisstructuur, de introductie van het experiment, heeft precies betrekking tot de discrepantie tussen alledaagse ervaring en wiskundige abstractie waar zojuist op is gewezen. De Italiaan beschouwde wiskunde als 'de taal waarin het boek der natuur'²¹ was geschreven en zodoende verstrekte wiskundige analyse inzicht in het functioneren van de natuurfenomenen zoals gegeven in de dagelijkse ervaring. Om echter te controleren of zijn wiskundige representaties van de natuur adequaat en dus informatief waren, onderscheidde Galilei volgens Cohen naast de alledaagse ervaring en wiskundige abstractie een derde werkelijkheidsniveau, namelijk het experimentele. Het experiment functioneerde in Galilei's denken

¹⁹ *Ibid.*, 121.

²⁰ *Ibid.*, 116.

²¹ *Ibid.*, 130.

als 'een roltrap' om tussen dagelijkse ervaring en wiskundige analyse heen en weer te reizen.²² Uit Galilei's aanname in de *Discorsi* dat valversnelling eenparig met de tijd toeneemt vloeide bijvoorbeeld consequenties voort die Galilei in proefopstellingen kon testen. Daarbij was het van belang testopstellingen zo ideaal mogelijk te maken. Om bijvoorbeeld te testen of een bewegend voorwerp onder ideale omstandigheden inderdaad in zijn beweging volhardt, rolde Galilei marmeren kogels over een marmeren vloer. In deze opstelling werden alle vormen van weerstand in zoverre mogelijk verwijderd. Zodoende werden wiskunde en werkelijkheid aan de hand van het toetsende experiment nauw op elkaar betrokken.

Volgens Cohen had 'niemand eerder [...] zoiets ondernomen'²³ en het belang dat hij hecht aan deze structurele veranderingen is groot. Hoewel deze transformatie in principe besloten lag in het Alexandrijnse gedachtegoed, vergrootte de drie eerdere transplantaties van deze traditie en de unieke omstandigheden in en het culturele klimaat van het vroegmoderne Europa de kansen op revolutionaire ontplooiing. Dankzij het groeiende aantal universiteiten was bijvoorbeeld een groot gedeelte van de Europese elite vertrouwd met Aristoteles en enige basale wiskundige kennis. Het belang van Galilei's structurele verdieping en verbreding schuilt hem bovenal in het feit dat het experiment een ongekende dynamiek bracht in het realistisch-wiskundige natuuronderzoek. De gecompliceerde spanning tussen 'wiskundige regelmaat en pogingen tot experimentele toetsing' zet aan tot onderzoek en vraagstellen, en maakte het voor het eerst in de wereldgeschiedenis mogelijk 'kennis te verwerven die niet alleen aannemelijk is maar die [tevens] hout snijdt.'²⁴ Galilei is, naast de hoofdrolspeler in Cohens eerste revolutionaire transformatie, eigenlijk de protagonist van Cohens Wetenschappelijke Revolutie, zoals een blik in het zakenregister inderdaad bevestigt.

§2.2 Vermij's Galilei: Baanbreker van een Cartesiaans universum

Merk op dat tot dusver de namen Kepler, Aristoteles, Ptolemaeus en Copernicus in de verband zijn gebracht met Galilei. In de vorige paragraaf is geschreven dat Vermij de Wetenschappelijke Revolutie bovenal begrijpt als een conceptuele transitie van Aristoteles' wereldbeeld naar dat van Descartes. Vermij plaatst Galilei dan ook tussen hen beiden. Cohen ontkent een dergelijk sterk verband, omdat Galilei en Descartes in zijn visie met heel andere zaken bezig waren. Als Alexandrijns denker was Galilei begaan met de wiskundige analyse en beschrijving van de natuur, terwijl Descartes naast wiskundige, bovenal een Atheens denker was die aan de hand van onfeilbare principes de natuur trachtte te verklaren. Cohen en Vermij lopen in hun karakterisering van Galilei dan ook sterk uiteen. Cohen legt een nadruk op de methodische, natuurkundige kant

²² *Ibid.*, 118.

²³ *Ibid.*, 129.

²⁴ *Ibid.*, 202-3.

van Galilei's denken, terwijl Vermij Galilei voornamelijk begrijpt als een baanbreker van Descartes' natuurfilosofie.

Vermij plaatst de wortels van Galilei's denken in de traditie van Italiaanse ingenieurs. De betekenis van deze ingenieurstraditie lag hem bovenal in hun ideaal van universele toepasbaarheid van de wiskunde en in overeenstemming met dit milieu zag Galilei de natuur als een grote, mechanische constructie.²⁵ Zijn fascinatie voor slingers, valbewegingen, materiaalsterkte en pompen wordt door deze achtergrond verhelderd. Maar, zo stelt Vermij, het belicht eveneens waarom Galilei als eerste de telescoop hanteerde om de hemel te bestuderen. In deze kringen deed namelijk het idee de ronde dat natuurkundige of 'filosofische' instrumenten ingezet konden worden om de natuur te bestuderen.²⁶ In 1610 maakte de Italiaan in zijn sterrenbode zijn bevindingen wereldkundig, waardoor hij in één klap een van de beroemdste natuuronderzoekers van Europa werd.

Waar Cohen grote betekenis hecht aan Galilei's nieuwe bewegingsbegrip, plaatst Vermij *Siderius nuncius* centraal. Copernicus had zestig jaar eerder zijn heliocentrisch model gepubliceerd, maar de boodschap van zijn hoofdwerk was dubbelzinnig en bovendien bleef tastbaar bewijs uit. Galilei illustreerde enkele Copernicaanse gedachten spraakmakend. Toen hij bijvoorbeeld zijn kijker op het firmament richtte zag hij bergen en kraters op de maan, een teken dat het Aristotelische onderscheid tussen een imperfect ondermaanse en perfect bovenmaanse problematisch was. De maan vertoonde immers oneffenheden gelijk aan de aarde. Korte tijd daarna ontdekte Galilei en andere natuuronderzoekers zonnevlekken, wat eveneens afbreuk deed aan Aristoteles' tweedeling. Venus vertoonde net als de maan fasen en draaide dus om de zon, en de bleek bovendien vier manen te hebben. Met deze laatste ontdekking werd een argument tegen het systeem van Copernicus ontwricht, daar het als een inconsistentie in zijn systeem werd beschouwd dat slechts om de aarde alleen een maan circuleerde. Vermij hecht bijzonder aan Galilei's *Siderius nuncius* omdat '[h]et schokeffect van zijn publicaties [...] uiteindelijk meer afbreuk [deed] aan het gezag van de aristotelische wijsbegeerte dan tientallen jaren van genuanceerde redeneringen hadden kunnen doen.'²⁷

Het is opvallend dat Vermij met woord rept over de door Galilei uitgevoerde experimenten. Weliswaar bespreekt hij kort Galilei's nieuwe ideeën over beweging en traagheid, maar hij ziet de Italiaan toch voornamelijk als een imperfecte Descartes. Na de zestiende-eeuwse periode van onzekerheid 'was er [omstreeks 1630] voor alles behoefte aan een visionair architect die alle oude zekerheden achter zich durfde te laten' en Galilei was daar, mede door zijn achtergrond als ingenieur, niet de juiste persoon voor.²⁸ Hij interesseerde zich voor losse natuurfenomenen, niet

²⁵ Vermij, *Kleine geschiedenis van de wetenschap*, 49.

²⁶ *Ibid.*, 68.

²⁷ *Ibid.*, 72.

²⁸ *Ibid.*, 76.

speculatieve totaalvisies. Door het Aristotelische onderscheid tussen boven- en ondermaanse materie fundamenteel aan te tasten, leverde hij slechts een vage notie hoe de nieuwe wereld eruit zou moeten zien. Descartes zou Galilei's voorzet omzetten tot een nieuwe natuurfilosofie, waarin de bewegingen van kwalitatief-identieke materiedeeltjes centraal zou staan.

§2.3 Henry's Galilei: Begiftigd bepleiter van realistische wiskunde

Vermij begrijpt Galilei dus als een vooraanstaand figuur in de transitie van het Aristotelische wereldbeeld naar het mechanische, en zoekt daarbij de wortels van Galilei's denken in een Italiaanse ingenieurstraditie. Hierboven is uiteengezet dat Henry de Wetenschappelijke Revolutie ziet als de periode waarin de Middeleeuwse, universitaire natuurfilosofie vermengd raakte met alternatieve benaderingen van de natuur die in sociaal aanzien waren toegenomen. Henry beschrijft hier dus een grote beweging in de geschiedenis waarin natuur-onderzoekende stromingen versmolten. De historicus noemt Galilei, die zijn positie aan de universiteit verruilde voor een carrière als "wiskundig filosoof" aan het hof van de Medici, als 'the greatest figure in this movement.'²⁹ Uit het antwoord op de vraag waarom Henry Galilei op deze wijze karakteriseert, zal echter een geheel andere Galilei blijken dan de tot dusver geanalyseerde natuuronderzoeker in het werk van Vermij en Cohen.

Gelijk aan Vermij, plaatst Henry Galilei in een ingenieurstraditie. Het is opvallend dat Cohen dit niet doet. De reden hiervoor is dat Cohen ingenieurs, zoals bijvoorbeeld de Nederland Simon Stevin, plaatst in de derde vorm van empirisch-praktische natuurkennis, terwijl Galilei werkzaam was binnen de Alexandrijnse traditie. Hoewel zowel Stevin als Galilei zich bezighielden met wiskunde, deden zij toch wezenlijk andere dingen. Henry's stelling dat de 'mathematical sciences were always concerned with practical, useful knowledge and the practioners were generally empiricist in their orientation, always testing the applicability of their mathematical techniques to understanding the real world' zou door Cohen dan ook stellig worden ontkend.³⁰ Daar waar Henry alle wiskundigen - Galilei, Simon Stevin, de gemengde wiskunde van de Jezuïeten - op een hoop gooit, probeert Cohen meer onderscheid aan te brengen. Hij draagt de derde vorm van natuurkennis weliswaar op als een *inspiratiebron* voor de introductie van realisme en experiment in het Alexandrijnse onderzoek en benadrukt in deze context het belang van opsporende experimenten van Vincenzo Galilei, Galilei's vader. Galilei's denkstappen waren desalniettemin grotendeels origineel en precies daarom begrijpt Cohen Galilei als een revolutionaire geest.

In Henry's werk zien we weinig van deze gedachtestroom terug. Galilei was 'undoubtedly a versatile and creative thinker,' maar uit historisch onderzoek is volgens de geschiedschrijver

²⁹ Henry, *The Scientific Revolution*, 27.

³⁰ *Ibid.*, 36.

bovenal het belang van zijn voorgangers gebleken.³¹ Galilei's combinatie van wiskundige analyse en experimentele toetsing, in Cohens revolutionaire transformatie zeer belangrijk, reduceert Henry tot de werkwijze van de Italiaanse *mathematici*, en Galilei's onderzoek naar beweging en valversnelling wordt in relatie gebracht met het werk van Middeleeuwse *impetus* theoristen zoals Nicole Oresme (1320-82) en wiskundige onderzoek binnen de kringen van de Jezuïeten. De realistische interpretatie van de wiskunde die Cohen aan Kepler en Galilei toeschrijft, brengt Henry in verband met Copernicus, waarbij hij overigens een discussie van de interne spanning in *De revolutionibus* achterwege laat. Kortom, de punten die Cohen als revolutionair beschouwt in het denkend doen van Galilei - introductie van het experiment, een nieuwe bewegingsbegrip en een realistische interpretatie van de wiskunde -, worden door Henry toegeschreven aan natuuronderzoekers die Galilei voorgingen.

Desondanks ziet Henry Galilei als 'the greatest figure in this movement.' Waarom dan precies? Henry ziet in het leven van de Italiaan het sterkst de sociale mobiliteit vertegenwoordigd die hij zo belangrijk acht voor een verklaring van de Wetenschappelijk Revolutie. Doordat het sociale aanzien van wiskundigen steeg, konden zij invloed uitoefenen op de natuurfilosofische kennisstructuur. Galilei's carrièresprong van universitair professor naar wiskundige filosoof aan het hof van één van de machtigste families van Europa is hier een bijzonder voorbeeld van. Vanuit deze positie heeft hij vergaand bijgedragen aan de mathematisering van de natuur. De kracht van Galilei's werk lag hem namelijk niet in zijn originaliteit, maar in zijn gave om zeer technische ideeën eenvoudig en pakkend uiteen te zetten. Henry schrijft dat '[r]epeatedly in his writings, Galilei teaches by example, showing how mathematical practice can help us to understand the nature of the world.'³² Om deze redenen behoort Galilei volgens Henry toe aan het pantheon van de Wetenschappelijke Revolutie.

§2.4 McClellan & Dorns Galilei: Conceptueel revolutionair

Net als Henry, begrijpen McClellan & Dorn Galilei's levensgeschiedenis als een treffende spiegeling van '[the] deep changes in the social character of science in the sixteenth and seventeenth centuries' en zijn het met hem eens, dat dit een reden is waarom Galilei als 'pivotal figure' deelneemt aan de Wetenschappelijke Revolutie.³³ Desalniettemin verschilt het werk van McClellan & Dorn niet alleen van Henry's, maar ook van de boeken van Vermij en Cohen. In tegenstelling tot Henry noemen McClellan & Dorn Galilei's technologische aanpassingen van de telescoop, zijn astronomische ontdekkingen en zijn onderzoek naar beweging en vallende objecten als factoren die bijdragen aan Galilei's faam. Van Henry's reductionisme is weinig terug te vinden.

³¹ *Ibid.*, 29.

³² *Ibid.*, 29.

³³ McClellan en Dorn, *Science and technology in world history*, 223.

Doordat McClellan & Dorn Galilei's natuur- en wiskundige werk uitgebreid behandelen, verschillen zij eveneens van Vermij, die weinig ruimte reserveert voor Galilei's materiaal- en bewegingsleer. In hun interpretatie van dit natuur-onderzoekende werk verschillen zij echter van Cohen, zoals uit het volgende zal blijken.

McClellan & Dorn begrijpen de *Discorsi* als Galilei's meest belanghebbende bijdrage aan de natuurkunde en de Wetenschappelijke Revolutie van de zestiende en zeventiende eeuw.³⁴ Meer dan de andere historici bespreken zij de inhoud van het werk, dag voor dag. Daarbij wijzen zij meerdere malen op het vernieuwende karakter van de *Discorsi*. Op de eerste dag analyseert Galilei een veelvoud aan technische en theoretische probleemstellingen waarvan sommige nooit van te voren waren bekeken. Op de tweede dag richt de Italiaan zich op de wiskundige beschrijving van balken waaraan gewichten zijn bevestigd, een onderwerp dat tot dan toe eveneens weinig bestudeerd was. Op de derde dag introduceert Galilei zijn nieuwe bewegingsbegrip dat hij op de vierde dag van de *Discorsi* toepast op worpbewegingen. Deze nieuwe conceptie van beweging is één van de twee redenen waarom McClellan & Dorn de *Discorsi* als van fundamenteel belang voor de Wetenschappelijke Revolutie beschouwen. Niet alleen raakte dit nieuwe begrip het Aristotelische kosmische orde in het hart, Galilei loste tevens een probleem waar natuuronderzoekers al tweeduizend jaar mee worstelden, namelijk de vraag hoe een geworpen voorwerp zich voortbeweegt door de lucht zonder contact met een directe beweger. Galilei's antwoord was dat objecten natuurlijke traagheid bezitten en dus helemaal geen beweger nodig hebben. 'Such is the stuff of scientific revolutions,' oordelen McClellan & Dorn overtuigd.³⁵ Galilei's realistische interpretatie van de wiskunde is de tweede redenen waarom McClellan & Dorn de *Discorsi* als revolutionair beschouwen. Met Henry zullen zij instemmen dat het werk van Oresme belangrijk is geweest voor de ontwikkeling van Galilei's eigen denken. Op een cruciaal punt verschillen zij echter van inzicht. Oresme interpreteerde zijn beschrijving van de valversnelling instrumenteel, als theoretisch model; Galilei begreep zijn wiskundige werk realistisch, ons inzicht biedend in de werkelijkheid.

Van wiskundig realisme is de overstap naar het experiment in het werk van Galilei snel gemaakt. Immers, als wiskunde iets vertelt over de werkelijkheid, dan is het zinvol om wiskundige conclusies te testen op hun werkelijkheidswaarde. Het is precies de introductie van het toetsende experiment waardoor Cohen spreekt van een verdieping van de Alexandrijnse kennisstructuur. In hoeverre er echter sprake is van *toetsend* experimenteel onderzoek wordt door McClellan & Dorn betwijfeld. De auteurs schrijven dat 'formally, Galileo reserved experiment not to test his propositions, as we might think retrospectively, but to confirm and illustrate his principles.'³⁶ Galilei bewees een stelling geometrisch om de waarschijnlijkheid van zijn conclusies vervolgens

³⁴ *Ibid.*, 234.

³⁵ *Ibid.*, 240

³⁶ *Ibid.*, 239.

experimenteel te illustreren. Van toetsend experiment is volgens het tweetal geen sprake, zoals er overigens in de gehele Wetenschappelijke Revolutie geen werkelijk toetsend experimenteel onderzoek zou zijn ondernomen.

Vier maal Galilei, door historici geïnterpreteerd en geplaatst in vier verschillende Wetenschappelijke Revoluties. Op sommige punten lopen deze interpretaties sterk uiteen, op andere punten minder. Allereerst verschillen de auteurs over de vraag in welke intellectuele traditie Galilei moet worden geplaatst. Henry en Vermij plaatsen Galilei in een traditie van Italiaanse ingenieurs en Cohen in de abstracte traditie van de Alexandrijnen. Hoe McClellan & Dorn de geestelijke wortels van Galilei plaatsen is niet helemaal helder, hoewel zij het werk van Middeleeuwse voorgangers noemen. Hiermee samenhangend is de vraag in hoeverre Galilei als een revolutionair kan worden beschouwd. Punten die door Cohen en McClellan & Dorn als vernieuwend worden beschouwd, reduceert Henry bijvoorbeeld tot voorgangers van Galilei. Vermij ziet Galilei daarentegen juist als een voorarbeider van Descartes, waardoor Galilei's aandeel in de Wetenschappelijke Revolutie enigszins in de schaduw van de Fransman komt te staan. Nog een punt van verschil, waar ligt de nadruk op het werk van Galilei? Zowel Cohen als McClellan & Dorn bespreken uitvoerig de conceptuele en methodische kanten van Galilei's *Discorsi*, zijn nieuwe bewegingsbegrip en experimenten, terwijl Vermij de nadruk legt op Galilei's *Siderius nuncius*. Galilei's revolutionaire conceptie van beweging wordt in zijn werk terloops genoemd.

Ook de historische nasleep van Galilei wordt verschillend geïnterpreteerd. Volgens Cohen heeft Galilei met zijn experimenten de dynamiek in het natuuronderzoek gebracht die zo kenmerkend is voor de moderne natuurwetenschap. Henry hecht, afgezien van Galilei's "popularisering" van de wiskunde, weinig waarde aan Galilei's onderzoek en ziet hem eenvoudig als een van de natuuronderzoeker die de mathematisering van het wereldbeeld ingang heeft gezet. Vermij brengt Galilei in direct verband met Descartes. McClellan & Dorn schrijven dat Galilei's directe invloed beperkt bleef door zijn verblijf aan het hof van de Medici; het is onduidelijk hoe zij de nasleep van Galilei precies plaatsen in het grotere kader van de Wetenschappelijke Revolutie. Kortom: vier Wetenschappelijke Revoluties, vier Galilei's. In het volgende paragraaf zal een studie naar de *Discorsi* zelf centraal staan.

§3 Galilei's experimenten

Klinkt uit Salviati's mond Galilei's ressentiment, wanneer hij stelt dat '[t]hings would not have be so bad if men who show with great breavity and clarity the fallacies of propositions that have commonly been held to be true by people in general received only such bearable injury as scorn in

place of thanks'? (*Opere*, VIII (204))³⁷ Publiekelijk vernederd en door de inquisitie onder huisarrest geplaatst, was Galilei gedwongen de laatste jaren van zijn leven te slijten in een dorpje vlak buiten Florence. Hem werd verboden over welk onderwerp dan ook te publiceren. Desalniettemin begon hij al in datzelfde jaar te werken aan zijn *Discorsi* en tussen 1633 en 1635 zou hij het grootste gedeelte van zijn dialogen op papier hebben uitgewerkt. Publiceren in Italië was natuurlijk geen optie meer, dus stuurde hij het werk op naar vrienden in steden als Parijs en Wenen; uiteindelijk zou het in 1638 verschijnen bij Elzeviers in Leiden.³⁸

Het boek, zoals destijds gepubliceerd, bevatte vier dagen. Een vijfde dag was door Galilei gepland, maar heeft hij niet naar eigen genoegen weten af te schrijven. Op alle vier de dagen zijn drie personages met elkaar in gesprek: Simplicio, Sagredo en Salviati. In tegenstelling tot de *Dialogo*, waarin deze karakters verwijzen naar verschillende personen, zijn deze namen in de *Discorsi* verbonden met verschillende periodes in de ontwikkeling van Galilei's denken over de natuur. Simplicio vertegenwoordigt daarbij Galilei in zijn eerste jaren, van huize uit Aristoteliaan, maar kritisch, sceptisch en bereidwillig om iets nieuws te accepteren wanneer dit eenmaal bewezen is. Sagredo representeert de Galilei van middelbare leeftijd. Hij stelt vragen die Galilei eerder in zijn leven bezig hadden gehouden en verdedigt posities die Galilei eveneens verdedigd had maar vervolgens verwierp.³⁹ Salviati fungeert tot slot als de representant van de volgroeide Galilei. Het is veelal dit personage dat de vragen van Simplicio en Sagredo beantwoordt en Galilei's stellingen verdedigt. Daarbij leest hij zo nu en dan voor uit het werk van "de Auteur" of spreekt hij van "onze Academicus," waarmee telkens de persoon Galilei wordt aangeduid.

In het werk bespreekt Galilei een veelvoud aan natuurfenomenen. Sommige van deze fenomenen werden door hem voor het eerst wiskundig-natuurfilosofisch behandeld, andere waren al eeuwen, zo niet millennia door filosofen en wiskundigen onderzocht. Aan het begin van de eerste dag merkt Salviati aangaande deze tweede groep onderwerpen op dat 'though some of the conclusions have been noted by others, and first of all by Aristotle, those are not the prettiest; and what is more important, they were not proved by necessary demonstrations from their primary and unquestionable foundations.' (55) Galilei's voorgangers lieten het na hun conclusies wiskundig te bewijzen. Dit echter is niet zijn enige punt van kritiek. Salviati vraagt zich bovendien af of Aristoteles zijn stellingen wel getest heeft, omdat, zoals uit de rest van dit paragraaf zal blijken, sommige van Aristoteles' assumpties helemaal niet overeenkomen met zintuigelijke waarneming. Galilei poogde zijn stellingen niet louter wiskundig te demonstreren, maar tevens experimenteel te

³⁷ De door mij gelezen vertaling is van Stillman Drake, *Galileo Galilei. Two new sciences. Including Centers of gravity & Force of percussion*, translated, with introduction and notes, by Stillman Drake (Londen, 1974). Deze vertaling is mij door prof. dr. H.F. Cohen ten zeerste aanbevolen. Verwijzingen in dit paper, aangegeven na een citaat met (...), refereren naar de betreffende pagina in de door Antonio Favaro samengestelde verzamelde werken van Galilei, *Le Opere di Galileo Galilei. Edizione Nazionale* (Florence, 1890-1909).

³⁸ Voor een meer compleet overzicht van de ontstaansgeschiedenis van de *Discorsi*, zie: Stillman Drake, *Galileo Galilei. Two new sciences*, x-xii.

³⁹ *Ibid.*, xiii.

bevestigen. Door middel van deze “experimenten” probeerde hij een brug te slaan tussen wiskunde en werkelijkheid. Het is nu eenmaal noodzakelijk, zegt Salviati op de derde dag tegen Simplicio, ‘[for] those sciences which apply mathematical demonstration to physical conclusions [...] to confirm their principles with sensory experiences.’ (212)

In de rest van dit paragraaf zullen twee passages uit Galilei’s tekst nauwkeurig worden uiteengezet. De keuze om twee kortere passages, elk ongeveer twintig pagina tellend, te behandelen komt voort uit de overtuiging dat alleen dan eer gedaan kan worden aan de helderheid en nuance waarmee Galilei zijn standpunten uiteenzet. Er is specifiek gekozen om deze passages uit de *Discorsi* te behandelen, allereerst omdat zij Galilei’s werkwijze en bewijsvoering goed in beeld brengen. Daarbij kan aan de hand van deze passages geïllustreerd worden, dat zijn benadering van de natuur omvangrijker is dan de tot dusver geanalyseerde historische werken doen denken. Meerdere malen zullen woorden als ‘experiment’ en ‘testen’ vallen, maar niet altijd zullen deze woorden hetzelfde betekenen, althans zo zal beargumenteerd worden. In §3.1 wordt een passage uit de eerste dag besproken, waarin valbeweging in het ledig en de lucht centraal staat. In §3.2 zullen vervolgens enkele van Galilei’s beroemde aantekeningen over eenparige valversnelling worden besproken.

§3.1 Dag één: Het ledig, de lucht en vallende objecten

Een van de vragen die het drietal tijdens de eerste dag behandelt, is de vraag waaraan objecten hun consistentie ontleen. Waarom vallen objecten niet uit elkaar? In Salviati’s antwoord staan twee hypothesen centraal: het *horror vacui*, de natuurlijke “angst” voor het ontstaan van een vacuüm, en, wanneer deze natuurlijke aversie onvoldoende is, ‘some sticky, viscous, or gluey substance that shall tenaciously connect the particles of which the body is composed.’ (59) Als aanhanger van de Peripatetische School wijst Simplicio het bestaan van het vacuüm van de hand, tot het moment waarop Sagredo hem verzoekt Aristoteles’ argumentatie tegen het bestaan van het vacuüm uiteen te zetten. Simplicio legt uit dat Aristoteles in zijn redentatie twee aannames maakte:

As to the first, he assumes that moveables differing in heaviness are moved in the same medium with unequal speeds, which maintain to one another the same ratio as their weights. [...] In the other supposition he takes it that the speeds of the same moveable through different mediums are in inverse ratio to the crassitudes or densities of the mediums. (105-6)

Simplicio vervolgt dat de tweede assumptie ten grondslag ligt aan Aristoteles’ argument tegen het bestaan van het vacuüm. Indien namelijk de snelheid waarmee een object valt afhankelijk is van de dichtheid van de tussenstof, valt een object met oneindige snelheid wanneer deze zich bevindt in een ruimte die oneindig leeg is, zoals het geval is in vacuüm. Dit is echter logisch onmogelijk,

omdat het impliceert dat een voorwerp zich tijdens zijn val op meerdere plekken tegelijk in de valrichting bevindt. Hieruit concludeert Aristoteles dat het vacuüm niet kan bestaan.

Salviati antwoordt dat Aristoteles' redentie niets zegt over het bestaan van het ledig, maar slechts betrekking heeft op de mogelijkheid van beweging in het vacuüm en dat zelfs dan Aristoteles' conclusie onwaar is. In de daarop volgende pagina's ontkracht Galilei Aristoteles' beide vooronderstellingen, om hier tegenover zijn eigen ideeën over beweging in het ledig en andere mediums te plaatsen. De ontwrichting van Aristoteles' grondstellingen voltrekt zich op twee manieren: door te verwijzen naar de ervaring en door logische redentie. Salviati betwijfelt of Aristoteles zijn eerste assumptie eigenlijk wel heeft getest, waarop Simplicio reageert dat uit de woordkeuze van de Griek blijkt dat hij zijn stellingen aan een experiment heeft onderworpen. Aristoteles schreef immers dat we "zien" dat een voorwerp sneller valt. Nu mengt ook Sagredo zich in het gesprek en vertelt dat hij Aristoteles' aanname wel heeft getest en dat 'a cannonball that weighs one hundred pounds [...] does not anticipate by even one span the arrival on the ground of a musket ball of no more than half [an ounce].' (107) Volgens Salviati kan echter ook zonder de ervaring, 'by short and conclusive demonstration' bewezen worden dat Aristoteles' eerste en tweede aanname onwaar zijn. In debat met Simplicio laat Salviati telkens opnieuw Aristoteles' principes in tegenspraak komen met beweringen die uit deze principes zijn gededuceerd, waardoor er voor Simplicio uiteindelijk 'no room for any quibble or reply whatever' over is, aldus Salviati. (112) Salviati concludeert ten eerste dat de snelheid van een vallend voorwerp onevenredig is met zijn gewicht, en ten tweede, dat de snelheid waarmee een voorwerp valt onevenredig is aan de dichtheid van de tussenstof waar het doorheen valt.

Vervolgens neemt Sagredo het stokje van Simplicio over en verzoekt Salviati te bepalen wat de relatie is tussen beide gevallen. Is er een relatie tussen de valsnelheden van voorwerpen van ongelijke gewichten en ruimtes van ongelijke dichtheid? Salviati vertelt dat wanneer ballen van lood, goud, hout en andere zware materialen van een toren naar beneden laten vallen, zij min of meer gelijktijdig de grond zullen bereiken ondanks evidente verschillen in gewicht. In kwik zullen alle metalen ballen daarentegen blijven drijven, op de gouden na. 'This seen,' zegt Salviati, 'I came to the opinion that if one were to remove entirely the resistance of the medium, all materials would descend with equal speed.' (116) Salviati vervolgt echter dat een luchtledige ruimte waarin zijn bewering getest kan worden niet bestaat en zijn stelling dus niet zintuigelijke onderbouwd kan worden.⁴⁰ Echter, schrijft hij, 'it seems to me that we may believe, by a highly probable guess, that in the void all speeds would be entirely equal.' (117)

Onder ideale omstandigheden vallen een veertje en een loden bal volgens Salviati dus simultaan. Bovendien theoretiseert hij dat voorwerpen altijd met eenparige versnelling vallen in de richting van het centrum van de aarde, '[which] must be assumed to be verified whenever all accidental and external impediments are removed. (118) Dat hier op aarde een veertje langzamer

⁴⁰ Het zou nog enkele tientallen jaren duren voordat de vacuümpomp ontwikkeld zou worden door Richard Boyle.

valt dan een loden bal heeft onder andere te maken met de luchtweerstand. Wanneer een vallend voorwerp door een medium beweegt, duwt het volgens Salviati deze tussenstof opzij, waardoor het voorwerp zichzelf een weg baant door het medium. Salviati begrijpt het gewicht van een object als 'the instrument by which the moveable makes its way.' Tijdens de val onttrekt de 'heaviness of the medium' gewicht van het vallende object, waardoor de natuurlijke neiging tot eenparige versnelling beïnvloedt wordt zodat uiteindelijk de weerstand van het tussenstof en de snelheid van het vallende object elkaar uitbalanceren. (119) Salviati illustreert zijn gedachten als volgt. Neem aan dat een stuk lood tienduizend maal zwaarder is dan lucht, een stuk ebbenhout slechts duizend maal. De lucht onttrekt aan het vallende lood 'one degree of speed in ten thousand, and from ebony one degree in one thousand, or ten in ten thousand.' (120) Dit betekent dat, wanneer we beide objecten laten vallen van een in tienduizend stukken opgedeelde hoogte, op het moment dat de kwantiteit lood de grond raakt, het stuk ebbenhout zich nog negen stukken 'opgedeelde hoogte' hoger in de lucht bevindt. Naarmate het verschil in gewicht tussen beide objecten groter wordt, zal de afstand tussen beide objecten in val groter worden naarmate de tijd verstrijkt. Deze redenatie komt volgens Galilei beter overeen met de ervaring dan Aristoteles' verklaring van verschillen in valsnelheden.

Sagredo staat perplex van Salviati's intrigerende uiteenzetting over 'inherently curious matter,' en verzoekt Salviati te bepalen wat dan wel het gewicht is van lucht, zodat zijn speculaties in de praktijk kunnen worden gebracht. (121) Nadat Salviati kort met Simplicio bediscussieert of lucht daadwerkelijk zwaar is, stelt hij het volgende experiment voor. Neem een grote, glazen flacon waarvan de opening stevig afgesloten is door middel voetbal-ventiel. Vervolgens laten we door het ventiel water naar binnen lopen zonder dat we lucht uit de flacon laten ontsnappen. Volgens Salviati kan ongeveer drievierde van de fles gevuld worden zonder al te veel druk uit te hoeven oefenen. (Deze hoeveel noemen we voor het gemak x .) Vervolgens wordt de gevulde flacon gewogen op een balans, waarna de flacon wordt geopend om de lucht eruit te laten ontsnappen. Er zal volgens Salviati precies evenveel lucht ontsnappen als dat er van te voren in de flacon was gepompt. Weeg de flacon wederom en vergelijk het verschil. Dit verschil is het gewicht van de hoeveelheid x aan lucht. '[S]ubtle and ingenious,' concludeert Simplicio.

§3.2 Dag drie: Afstand en natuurlijke eenparige versnelling

Bij aanvang van de derde dag leest Salviati voor uit een Latijns traktaat van de Auteur, oftewel Galilei. In de introductie van het traktaat, getiteld 'On local motion,' schrijft de Auteur dat in het werk 'a brand new science concerning a very old subject' gepresenteerd zal worden, namelijk beweging op aarde. (190) Hoewel filosofen boekkasten aan wijsgerige reflecties over dit onderwerp hebben volgeschreven, is wat Galilei te melden heeft, voor zover hijzelf beziet, compleet nieuw. Zijn traktaat is in drie delen opgedeeld waarin drie verschillende bewegingen geanalyseerd

worden: eenparige beweging, eenparige versnelling en worpbewegingen (waaraan het drietal hun vierde dag zal wijden). Elk deel kent een rigide structuur van assumpties, definities en wiskundige bewijsvoering van afgeleide proposities. Tijdens zijn voordracht van het traktaat wordt Salviati bij tijd en wijle onderbroken door Sagredo of Simplicio, die verzoeken om nadere toelichting of zelf een eigen bewijs willen toevoegen.

Aan het begin van het tweede deel van het traktaat bespreekt Galilei waaraan een definitie van eenparige versnelling moet voldoen. Daar vallende objecten tijdens hun val van nature versnellen, heeft de auteur ervoor gekozen de eigenschappen van deze natuurlijke beweging te bekijken en zijn definitie van eenparige versnelling in overeenstemming te brengen met 'the essence of naturally accelerated motion.' Daar Galilei's 'essentials successively demonstrated' overeenstemmen met 'physical experiments,' is hij overtuigd dat hij in het formuleren van een adequate definitie is geslaagd. (197) Zijn definitie luidt:

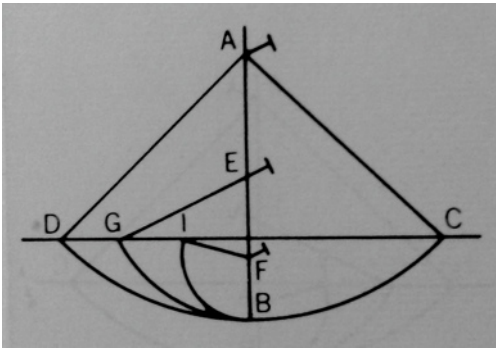
[T]hat motion is equably or uniformly accelerated which, abandoning rest, adds on to itself equal momenta of swiftness in equal times. (198)

Sagredo's eerste reactie is terughoudend. Daar tijd oneindig deelbaar is, zal een vallend object zeer grote, maar ook zeer kleine snelheden maken, aan het begin van zijn val zelfs zo klein dat het voorwerp nog geen kilometer in een uur of dag zal afleggen. Maar wanneer een object valt, *zien* we toch dat het direct grote snelheden maakt? Salviati antwoordt dat hijzelf lange tijd met dergelijke twijfels worstelde, maar dat de ervaring hem tevens van zijn twijfel verlost. Wanneer een vallend voorwerp de grond of een ander oppervlakte bereikt, heeft dit een bepaalde inwerking op dat oppervlakte. Deze inwerking is afhankelijk van het gewicht van het vallende object en de snelheid waarmee het de grond raakt: hoe groter de snelheid, des te groter de impact. Laten we een zwaar voorwerp een meter boven een stenen vloer los, dan is de kans op butsen groot. Laten we hetzelfde voorwerp echter los op minimale hoogte - Salviati noemt de dikte van een boomblad - dan zal de impact nihil zijn. Hieruit kan opgemaakt worden dat de aanvankelijk snelheden van het vallende object zeer klein zijn. Zou het voorwerp namelijk direct aanzienlijke vaart maken, dan zou het ook vallend vanaf een minimale hoogte het onderliggende oppervlakte moeten beschadigen, wat door de waarneming wordt tegengesproken.

Naast zijn definitie, geeft de auteur bij aanvang ook een postulaat:

I assume that the degrees of speed acquired by the same moveable over different inclinations of planes are equal whenever the heights of those planes are equal. (205)

Hoewel Galilei Sagredo laat reageren dat deze assumptie zo waarschijnlijk is dat argumentatie overbodig is, zegt Salviati de waarschijnlijkheid van de assumptie dusdanig te willen vergroten 'by an experiment that it will fall little short of equality with necessary demonstration.' (205-6) Salviati



Afb. 1 Galilei's pendule experiment

vraagt zijn gesprekspartners een pendule voor te stellen, aan een muur bevestigd op punt *A* en losgelaten op punt *C*, zodat de pendule eerst de baan *CB*, en vervolgens *BD* beschrijft (zie afb. 1). De weerstand van de lucht en van het draad zelf zullen de pendule ervan weerhouden precies op de hoogte van lijn *CD* terug te keren, maar desondanks kunnen we volgens Salviati waarlijk concluderen dat 'the impetus acquired by the ball at point

B in descent through arc *CB* was sufficient to drive it back up again to the same height through a similar arc *BD*.' Wanneer we vervolgens een tweede spijker *E* en een derde spijker *F* loodrecht onder spijker *A* in de muur slaan, zal de pendule, wanneer losgelaten op punt *C*, wederom de hoogte *CD* bereiken, maar nu daarbij resp. de bogen *BG* en *BI* beschrijven. Hiermee wordt volgens Salviati de waarheid van de assumptie van de auteur afdoende bewezen. Omdat de bogen *CB* en *DB* gelijk zijn aan elkaar, en de snelheid die de pendule heeft bereikt op punt *B*, nadat deze is losgelaten op punt *C*, precies voldoende is om punt *D* te bereiken, is de snelheid die de pendule maakt tijdens de val *DB* ook precies voldoende om punt *D* wederom te bereiken. Dus de snelheid van de pedule na de val *GB* is voldoende om *G* weer te bereiken, evenals de snelheid van de pedule na de val *IB* voldoende is om punt *I* weer te bereiken. Maar de snelheid op punt *B* die de pendule nodig heeft om de bogen *BD*, *BG* en *BI* te beschrijven is constant, namelijk de snelheid die het heeft verkregen door de val *CB*. Kortom: de snelheid die de pendule heeft op punt *B* na de vallen *DB*, *GB* en *IB* is telkens hetzelfde. Tot dusver is er gesproken over een val die een boog beschrijft en niet, zoals in het postulaat wordt aangenomen, over een vallend object dat tijdens zijn val een rechte lijn beschrijft. Salviati stelt echter: 'it seems to me that the mind understands that the impetus [derived at when a moveable is to descend along straight inclined planes], which in fact takes [its] strength from the amount of the drop, would be able to carry the moveable back up to the same height.' (207) Hiermee is het postulaat volgens Salviati voldoende experimenteel ondersteund.

Vervolgens demonstreert de auteur zijn eerste twee proposities, waaruit zijn eerste conclusie volgt: 'when the degrees of speed are increased in equal times according to the simple series of natural numbers, the spaces run through in the same times undergo increases according with the series of odd numbers from unity.' (210) Hieruit volgt dat de totale afstand die een eenparig versneld object aflegt gelijk is aan het kwadraat van de tijd van de beweging. Hierna onderbreekt Sagredo Salviati's voordracht om de eerste conclusie van de Auteur zelf onder woorden te brengen. Sagredo illustreert de stelling door middel van een eenvoudige grafiek, waarin de eenparige valversnelling weergegeven wordt door middel van een stijgende rechte lijn en de totaal afgelegde afstand berekend kan worden door de ruimte onder de stijgende lijn te

meten. Sagredo's grafiek blijkt inderdaad aan de wetmatigheid van de Auteur te voldoen, de afstand die een eenparig versneld object aflegt is gelijk aan het kwadraat van de valperiode.

Simplicio is blij met Sagredo's uiteenzetting die hij minder obscure vindt dan de demonstraties van de Auteur, maar vraagt zich nog steeds af 'whether this is the acceleration employed by nature in the motion of her falling heavy bodies' en verzoekt Salviati een experiment ter ondersteuning van de gedemonstreerde conclusies te beschrijven. Salviati's antwoord is inmiddels befaamd: 'Like a true scientist, you make a very reasonable demand, for this is usual and necessary in those sciences which apply mathematical demonstrations to physical conclusions, [...] who confirm their principles with sensory experiences that are the foundations of all the resulting structure.' (212) Vervolgens beschrijft hij de test die hij samen met de Auteur meerdere malen heeft ondernomen. In een houten balk van twaalf *braccia* lang gutsten het tweetal een geul die vervolgens met velijn, kalfsperkament van zeer goede kwaliteit, werd bekleed. Vervolgens liet het tweetal een bronzen bal vanaf diverse hoogte door de gleuf schuin naar beneden rollen. Door het kalfsperkament zeer glad te strijken en de bal te polijsten, werd de wrijvingsweerstand tot een minimum beperkt. De tijd dat de bal erover deed om de grond te bereiken werd bijgehouden door middel van een met water gevulde emmer die constant druppelde in een beker, zodat de duur van een beweging uitgedrukt kon worden in een opgevangen hoeveelheid water. Honderden keren lieten ze de bal rollen van diverse hoogten, en daarbij positioneerden ze de balk tevens in diverse hoeken. Vervolgens konden ze de verhouding tussen de opgevangen hoeveelheid water en door de bal afgelegde afstand berekenen, waaruit bleek dat de afgelegde afstand altijd het kwadraat was van de tijd. Het experiment bevestigde dus de wiskundige demonstraties van Sagredo en de Auteur: in natuurlijke eenparige versnelling verhoudt de afstand zich als het kwadraat van de tijd. Simplicio is overtuigd en het drietal vervolgt hun bespreking van de andere proposities die de Auteur uit zijn definitie en assumptie heeft afgeleid.

§4 Wiskunde en werkelijkheid. Een vijfde Galilei?

In de vorige paragraaf is gedetailleerd ingegaan op twee passages uit de *Discorsi*. In de volgende paragraaf zullen de in deze passages beschreven experimenten worden geanalyseerd en onderverdeeld worden in drie categorieën: testende experimenten, gedachte-experimenten en onderzoekende experimenten. Hierna zal de *Discorsi* vergeleken worden met de vier besproken historische werken .

§4.1 Galilei's experimenten geanalyseerd

Opvallend zijn Galilei's herhaaldelijke pogingen een brug te slaan tussen zijn abstract-beredeneerde inzichten en de natuurfenomenen zelf. Dit doet de vraag stellen waarom. Overeenstemming met datgene wat in de ervaring is gegeven, lijkt voor Galilei een criterium van zekerheid te zijn voor beweringen over natuurfenomenen. Precies, of eigenlijk mede op grond van dit criterium wijst hij, uiteraard bij monde van Salviati, Aristoteles' conceptie van vallende objecten van de hand. Aristoteles heeft zijn aannames namelijk nooit getest. Galilei's andere criterium van zekerheid is dat een theorie logisch-conceptueel steekhoudend is en ook om deze reden wijst hij Aristoteles' stellingen van de hand. Galilei benadrukt veelvuldig dat zijn eigen stellingen daarentegen wel in overeenstemming zijn met datgene wat hij aantreft in de natuur. Zo schrijft hij vlak na de introductie van zijn idee dat de verschillen in valsnelheid hier op aarde veroorzaakt worden door externe omstandigheden zoals luchtweerstand: '[Reasoning with this rule, I believe, we shall find that experience fits the computation much better than it fit's Aristotle's rule.]' (120) Ook wanneer Galilei zijn definitie van natuurlijke eenparige valversnelling presenteert, benadrukt hij deze veelvuldig experimenteel te hebben beproefd en precies daarom claimt hij tot een adequate definitie gekomen te zijn. Deze komt immers overeen met de 'essence of naturally accelerated motion.' Elders noemt hij zijn inzicht dat in het ledig alle valsnelheden gelijk zijn 'a highly probable guess,' maar zintuigelijke toetsing, in Galilei's tijd nog onuitvoerbaar, zou haar meer zeker hebben gemaakt. Kortom, zintuigelijke bevestiging vergroot de waarschijnlijkheid van wiskundige representatie. Zoals Salviati instemmend reageert op Simplicio's vraag of Galilei's definitie van valversnelling wel daadwerkelijk overeenstemt met natuurlijke valversnelling: '[it] is usual and necessary in those sciences which apply mathematical demonstrations to physical conclusions, [to] confirm their principles with sensory experiences [...].' (212)

In sommige van zijn experimenten zoekt Galilei daadwerkelijk naar deze zintuigelijke bevestiging. Het meest beroemde voorbeeld hiervan is zijn valexperiment met bewerkte balk en bronzen bal. Zeer uitvoerig beschrijft Salviati hoe de Auteur en hij een balk omtoverden tot knikkerbaan, om Simplicio ervan te overtuigen dat de door de Auteur beschreven valversnelling meer is dan theoretische constructie. Een ander voorbeeld van een dergelijk bevestigend experiment, hierboven echter niet beschreven, is Galilei's experiment ter ondersteuning steunen van zijn inzicht dat valsnelheid onafhankelijk is van gewicht. (128-30) Salviati zet uiteen hoe hij een loden en een kurken bal honderden keren van een hellend vlak liet rollen om te bevestigen dat 'they sensibly showed that the heavy one kept time with the light one so well that not in a hundred oscillations [...], does it get ahead in time even by a moment, but the two travel with equal pace.' (129) Tekenend voor dergelijke experimenten is Galilei's beschrijving van de problematiek die met dergelijke onderzoek gepaard ging en de manier waarop deze complicaties werden omzeild. Hoe beperk ik de natuurlijke weerstand tijdens valbewegingen tot een minimum? Hoe

onderzoek ik een valbeweging überhaupt, daar (verticaal) vallende objecten zeer snel de grond bereiken? Er lijkt geen twijfel over mogelijk dat Galilei de experimenten daadwerkelijk heeft uitgevoerd om ze in de *Discorsi* door Salviati uit de doeken te doen.

Experimenten kunnen een stelling bevestigen, maar tevens ontkrachten. Sagredo's experiment ter beproeving van Aristoteles' eerste assumptie is hiervan een voorbeeld. Laat twee ballen van verschillende gewichten van een toren vallen, en de afstand tussen beiden zal niet zo groot zijn als Aristoteles voorspelde. Een ander voorbeeld van dergelijk ontkrachtend experimenteel onderzoek is Salviati's weerwoord wanneer Sagredo de valversnelling betwijfeld. We zien immers toch dat een vallend voorwerp direct grote snelheid maakt? Salviati verwerpt deze gedachte op basis van een mini-experiment: Laat een zwaar voorwerp van minimale hoogte vallen en bekijk de impact van het voorwerp op de ondergrond en je zal overtuigd zijn dat een voorwerp niet per direct grote snelheid maakt. Deze experimenten vallen eveneens onder een eerste categorie van toetsende experimenten, experimenten die bevestigen of ontkrachten.

In andere passages uit de *Discorsi* lijkt Galilei echter eerder gedachte-experimenten dan fysiek-uitgevoerde experimenten te beschrijven, zoals zijn experiment met de pendule dat hierboven is beschreven. Merk op dat Galilei zelf geen onderscheid maakt tussen dergelijke vormen van onderzoek en ze allemaal aanduidt met het woord "experiment." Alleen al afgaande op Galilei's taalgebruik in beschrijving van de verscheidene experimenten, lijkt er echter sprake te zijn van kwalitatieve verschillen. Van Galilei's anekdotische schrijfstijl is in de beschrijving van zijn pendule-experiment weinig terug te vinden. Daar omschrijft hij abstract en in taaie taal de boogbewegingen van een kogel, om te concluderen dat '*the mind understands that the impetus [...] would be able to carry the moveable back up to the same height.*' (207, cursivering door mijzelf - SB) Dergelijke experimenten lijken eerder een illustratie te zijn van een principe dat Galilei dan wel wiskundig heeft gedemonstreerd, dan wel heeft geassumeerd, en geen bevestigende experimenten.

Los van deze twee vormen van experiment, hanteert Galilei een derde soort. Een voorbeeld hiervan is het experiment dat Salviati aan Sagredo beschrijft om het gewicht van lucht te bepalen. Hier lijkt Galilei niet direct één van zijn inzichten empirisch te willen ondersteunen, maar eerder een interessante vraag te willen beantwoorden die voortkomt uit van zijn theoretische ideeën, in dit geval zijn conceptie van de valsnelheid in verschillende mediums. De vraag 'Wat weegt lucht?' komt voort uit een onderzoekende nieuwsgierigheid naar eigenschappen van de natuur, en is in die zin vergelijkbaar met een vraag als 'Wat gebeurt er met een levend diertje in het luchtledig?' Een ander voorbeeld van een dergelijk experiment, hierboven wederom niet beschreven, is Galilei's poging om de kracht van het ledig te bepalen. (61-3) De vraag komt voort uit een hypothese, namelijk dat een vacuüm verantwoordelijk is voor de cohesie van lichamen, maar het door Galilei voorgestelde experiment om de kracht van het vacuüm te bepalen heeft niet direct het karakter van een bevestigend experiment. De Italiaan beschrijft hoe je een naadloos

passende stop bevestigd in een met water gevulde glazen beker op ongeveer tweederde van de hoogte van het glas, zodat, wanneer je de beker op de kop houdt, de stop niet naar beneden zakt uit “angst” voor het vacuüm dat anders ontstaat. Vervolgens hang je gewichten aan een haak die gemonteerd is aan de stop, net zolang totdat de kracht van het vacuüm tussen de stop en het water bezwijkt voor het gewicht, zodat de stop in het glas naar beneden zakt. ‘Then,’ stelt Salviati, ‘by weighing the piston, together with the iron, the container, and whatever it contains, we shall have the amount of force of the void.’ (62-3) In beide experimenten wordt de natuur door middel van een proefopstellingen gedwongen een van haar verborgen eigenschappen bloot te geven.

In de *Discorsi* bespreekt Galilei vele onderzoeken waarnaar hij steevast verwijst als ‘experiment,’ maar bij nader inzien blijken deze verschillende doeleinden te dienen. Een eerste categorie experimenten kan als fysiek-bevestigend of testend worden beschouwd, een tweede als illustrerend of conceptueel-bevestigend, en een derde als opsporend. Uit deze bespreking van de *Discorsi* blijkt mijns inziens een enthousiast en vindingrijk natuuronderzoeker, verscheidene experimentele praktijken beproevend om de fenomenen der natuur te onderzoeken en de waarschijnlijkheid van zijn eigen theorieën te beproeven.

§4.2 Galilei en de historici

Hoe verhoudt deze experimenterende Galilei zich tot de vier historische werken hierboven beschreven? Ik zal aanvangen met het werk van Henry en Vermij om te eindigen bij de werken van Cohen en McClellan & Dorn.

Henry beschouwde Galilei als ‘the greatest figure’ in het mengproces van wiskunde en natuurfilosofie. In zijn levensgeschiedenis ziet Henry namelijk de sociale mobiliteit aanwezig die door hem begrepen wordt als belangrijke oorzaak van de Wetenschappelijke Revolutie. Hij beschouwt Galilei niet als revolutionaire geest, maar als een schrijver met de bewonderingswaardige gave technische ideeën eenvoudig en vermakelijk uiteen te zetten, waarmee de mathematisering van de natuur een belangrijke impuls gegeven werd. Inderdaad, over het geheel genomen leest Galilei’s *Discorsi* als een trein. Het werk werd gepubliceerd in het Italiaans en had als doel zoveel mogelijk individuen vertrouwd te maken met zijn ideeën. Aan een prettige leesstijl draagt voornamelijk de dialogische structuur bij. Wanneer Salviati een ingewikkelde stelling poneert of een passage voorleest uit het traktaat van de Auteur, laat Galilei Simplicio of Sagredo vragen om verheldering of toelichting. De informatiedichtheid van de tekst varieert dankzij deze structuur eveneens. Het werk heeft zeker een literaire waarde en bovendien laat Galilei het niet na, zo nu en dan een grap in zijn tekst te verwerken.

Eventuele revolutionaire denkstappen door Galilei ondernomen worden door Henry toegeschreven aan diens voorgangers. Zowel Henry als Vermij plaatsen Henry in een Italiaanse ingenieurstraditie, een traditie die door Cohen geïnterpreteerd wordt als een empirisch-praktische

vorm van natuurkennis die in principe weinig van doen had met de meer abstract-theoretische traditie van de Grieken. Afgaande op het werk van Galilei lijkt het ook beter hem te plaatsen in deze Griekse traditie. Hoewel hij menigmaal aanstipt dat zijn wiskundige werk praktische consequenties zal hebben, is hij toch voornamelijk in discussie met Aristoteles over theoretische aangelegenheden, waarbij hij geregeld citeert uit het werk van 'Alexandrijnen' zoals Archimedes. Hebben deze Italiaanse ingenieurs door Vermij en Henry met Galilei in verband gebracht in hun traktaten de oneindigheid en de ondeelbaarheid besproken, zoals Galilei dit deed op de eerste dag? Probeerden zij te verklaren waaraan lichamen hun consistentie ontleen of de kracht van het vacuüm te berekenen? Weerlegde zij Aristoteles' concept van valbeweging door te wijzen op de bewegingen van daadwerkelijk vallende objecten? Galilei was bovenal bezig de natuur conceptueel-mathematisch te doorgronden zonder daarbij geïnteresseerd te zijn in directe, praktische toepassing van zijn inzichten. Dit neemt niet weg dat deze Italiaanse ingenieurstraditie kan beschouwd worden als een inspiratiebron.

Vermij plaatst Galilei tussen Aristoteles en Descartes omdat Galilei met *Siderius nuncius* een grote klap toebedeelde aan het Aristotelische onderscheid tussen het bovenmaanse en ondermaanse. Hierdoor werd Descartes' conceptie van een universum bestaande uit homogene materie bewegend volgens vaste natuurwetten voorbereid: Galilei is zelf nooit tot een dergelijke totaalvisie gekomen, omdat hij hier, conform zijn ingenieursachtergrond, niet in geïnteresseerd was. Het is echter opvallend dat Vermij in zijn werk geringe aandacht besteedt aan Galilei's nieuwe bewegingsconcept en de experimentele wijze waarop hij zijn nieuwe ideeën onderbouwden, juist omdat Galilei door middel van deze ideeën de Aristotelische leer in het hart raakte. Beweging stond namelijk centraal in de kosmische orde van Aristoteles. Aristoteles verklaarde de wereld te zijn zoals die is, door de vijf constituerende elementen van de kosmos een natuurlijke positie toe te dichten. Beweging van deze elementen is georiënteerd op deze natuurlijke plaatst. Galilei ontcrachtte precies dit idee van absolute beweging als de verwezenlijking van een doel, en daarmee de kern van Aristoteles' natuurfilosofie.⁴¹ Vermij beweert weliswaar dat het schokeffect van *Siderius nuncius* 'uiteindelijk meer afbreuk [deed] aan het gezag van de aristotelische wijsbegeerte dan tientallen jaren van genuanceerde redeneringen hadden kunnen doen,' tegelijkertijd moet hij schrijven dat er aan het einde van de zeventiende eeuw geen sprake was van een revolutie in het algehele, dagelijkse wereldbeeld.⁴² Een revolutionaire ontwikkeling deed zich echter wel voor in het intellectuele, wetenschappelijke wereldbeeld en Galilei's 'genuanceerde redeneringen' over beweging hebben hier zeker aan bijgedragen. Juist de *Discorsi* verdient het door Vermij besproken te worden.

Vermij schrijft de mathematisering van de natuur toe aan Descartes. Henry noemt niet Descartes of Galilei, maar Copernicus als eerste natuuronderzoeker die de wiskunde hanteerde

⁴¹ Cohen, *De herschepping van de wereld*, 155.

⁴² Vermij, *Kleine geschiedenis van de wetenschap*, 100-106.

om de natuur te doorgronden. Copernicus zou als eerste natuuronderzoeker zijn mathematische modellen realistisch hebben geïnterpreteerd. Dit echter is problematisch, daar zijn hoofdwerk een interne spanning kent. In het eerste boek presenteerde Copernicus een vereenvoudigde versie van zijn planetaire model en betoogde dat de aarde ook daadwerkelijk een dubbele draaiing maakt. De vijf andere boeken van *De revolutionibus* stonden echter vol met abstracte modellen die zijn lezers eveneens konden vinden in Ptolemaeus' *Almagest*, maar dan nu van vereffeningspunt ontdaan.⁴³ Om deze reden is het beter om Copernicus' werk te beschouwen als 'a revolution-making rather than a revolutionary text,' zoals wetenschapshistoricus Thomas Kuhn het ooit formuleerde.⁴⁴ Door de onduidelijkheden rondom *De revolutionibus* dient Copernicus, contra Henry, niet begrepen te worden als wiskundig realist.

Cohens interpretatie van Copernicus sluit aan bij die van Kuhn, en dat heeft consequenties voor de rol die Galilei in zijn Wetenschappelijke Revolutie krijgt toebedeeld. Kepler en Galilei zagen elk op eigen wijze 'de waarheid die in Copernicus' werk school,' waardoor 'de tijdbom die een halve eeuw lang vredig in het boek van Copernicus had liggen voorttikken' nu plotseling explodeerde.⁴⁵ Deze explosie begrijpt Cohen als de eerste van zes revolutionaire transformatie die gezamenlijk de Wetenschappelijke Revolutie vormden. Deze transformatie kenmerkt zich door zowel een verbreding als verdieping van de overgeleverde Alexandrijnse kennisstructuur. We zien Galilei in zijn *Discorsi* beide processen voltrekken. Enerzijds worden nieuwe natuurfenomenen mathematisch behandeld, anderzijds probeert Galilei herhaaldelijk de wiskunde aan te laten sluiten bij de werkelijkheid door middel van toetsende experimenten. De mogelijkheid van deze transformatie lag reeds besloten in het gedachtegoed van de Alexandrijnen, maar Kepler en voornamelijk Galilei hebben deze potentie geactualiseerd.

Zowel McClellan & Dorn als Cohen beschouwen de *Discorsi* als een belangrijk en revolutionair werk. Alle drie wijzen daarbij op het belang van Galilei's nieuwe bewegingsbegrip en zijn realistische interpretatie van de wiskunde. Voor Cohen ligt het revolutionaire karakter van dit bewegingsbegrip vooral daarin, dat het indruist tegen de dagelijkse ervaring. Dit begrip was afkomstig uit de abstracte wereld van de Alexandrijnen en deze wereld wist Galilei door middel van toetsende experiment in relatie te brengen met de alledaagsheid, en wel zo dat natuurprocessen onder ideale omstandigheden ons iets vertellen over natuurprocessen in onze ervaring. McClellan & Dorn wijzen er net als Cohen op dat Galilei's bewegingsbegrip niet alleen tegen Aristoteles' idee van beweging inging, maar dat met dit nieuwe idee tevens het probleem van de valversnelling werd opgelost en een belangrijk tegenargument tegen de leer van Copernicus ontkracht werd bovendien. Net als Henry beschouwen McClellan & Dorn het werk van Oresme over de valversnelling als belangrijk voor Galilei's ontwikkeling, maar Galilei voegde iets toe aan Oresmes

⁴³ Cohen, *De herschepping van de wereld*, 90.

⁴⁴ Kuhn, geciteerd in: Henry, *The Scientific Revolution*, 20.

⁴⁵ Cohen, *De herschepping van de wereld*, 110-1.

werk: bewust sprak hij over ‘*naturally accelerated motion*,’ terwijl het werk van zijn Middeleeuwse voorganger puur wiskundige analyse van versnelde beweging betrof zonder verwijzingen naar werkelijke valversnelling in de natuur.

Dit gezegd hebbende, kom ik aan bij het eigenlijke onderwerp dat al deze onderzoeken verbindt, namelijk de rol van experimenten in de *Discorsi*. Henry’s standpunt in deze dient buiten beschouwing te worden gelaten, omdat een oordeel over zijn standpunt een vergelijking tussen het werk van Galilei en de *mathematici* veronderstelt. Op het contrast tussen McClellan & Dorn en Cohen kan wel enig licht worden geworpen. Volgens Cohen introduceerde Galilei het toetsende experiment in de Alexandrijnse kennisstructuur, waarmee de Italiaan testte of zijn wiskundig ‘aannemelijk ogende bewering[en]’ meer waren dan wiskundig ‘aannemelijk ogende bewering[en]’ alleen.⁴⁶ McClellan & Dorn ontkennen dat ‘toetsend’ een adequate karakterisering van Galilei’s experimentele onderzoek is. De auteurs schrijven dat ‘formally, Galileo reserved experiment not to test his propositions, as we might think retrospectively, but to confirm and illustrate his principles.’⁴⁷ Galilei bewees een stelling geometrisch om de waarschijnlijkheid van zijn conclusies vervolgens experimenteel te illustreren.

De vraag hier is echter allereerst wat de auteurs precies bedoelen met ‘formally.’ Formeel naar welke maatstaven, de hedendaagse? Dit lijkt inderdaad het geval te zijn wanneer de passage die volgt op dit citaat bestudeerd wordt. Ze merken op dat hoewel het experiment met een bal op een hellend vlak bijzonder onnauwkeurig is geweest (neem bijvoorbeeld alleen al Galilei’s methode om de tijd te meten), de Italiaan desondanks concludeerde dat zijn eerdere wiskundige analyse ook empirisch-experimenteel bewaarheid was. Van proper toetsend experiment kan dus niet gesproken worden. Ik denk dat Cohen deels kan instemmen met deze bepaling: Galilei onderschatte volgens hem nogal eens de discrepantie tussen het alledaagse en het wiskundig-ideale,⁴⁸ wat eveneens kan verklaren waarom Galilei van mening was dat zijn wiskundige bepalingen empirisch werden bevestigd. Desalniettemin lijkt dit niets af te doen aan het karakter van sommigen van Galilei’s experimenten. Het is anachronistisch om de vraag te stellen of Galilei zijn wiskundige bepalingen wel formeel heeft getest. Cruciaal is Galilei’s gedachte achter deze experimenten: “mijn definities beschrijven de werkelijkheid en door middel van experimenten beproef ik of ze deze werkelijkheid wel daadwerkelijk beschrijven.” Wiskundige principes dienen zintuigelijk bevestigd te worden. Dit is, lijkt mij, toetsend-experimenteel onderzoek.

Desalniettemin is een tweede categorie experimenten te ontwaren die een meer gedachte-experimenteel karakter hebben, en dus inderdaad dienen ter illustratie van een conclusie of assumptie en niet ter empirische toetsing hiervan, zoals McClellan & Dorn beoordelen. In dit paper

⁴⁶ *Ibid.*, 11.

⁴⁷ McClellan en Dorn, *Science and technology in world history*, 239.

⁴⁸ Cohen, *De herschepping van de wereld*, 121

is Galilei's pendule experiment als voorbeeld. Een derde categorie experimenten heeft weer een ander karakter, namelijk het ontbloten van de geheimen van de natuur. Cohen noemt dergelijk onderzoek *opsporend* experimenteel en relateert haar aan de empirisch-praktische vorm van natuurkennis. Cohen schrijft dat '[a]ls de natuur niet vrijwillig, via spontane waarneming haar geheimen prijsgeeft, [het zaak is] een proefbestelling te bedenken waardoor ze kunstmatig wordt gedwongen haar eigenschappen te tonen.'⁴⁹ Dit lijkt me een adequate beschrijving van de derde categorie experimenten die in dit paper zijn onderscheiden. Het gewicht van lucht en de kracht van een vacuüm konden niet met het blote oog gemeten worden, dus bedacht Galilei proefopstellingen om deze metingen te doen. Deze experimenten hadden niet als doel het toetsen van een aanname of conclusie: ze kwamen voort uit de nieuwsgierigheid om bepaalde eigenschappen van de natuur te ontbloten.

Resumerend en vooruitlopend op mijn conclusie: Geen van de auteurs bespreekt mijns inziens de experimenten van Galilei uitputtend. Vermij bespreekt zijn experimenten niet. Henry bespreekt Galilei's experimentele onderzoeken summier, maar hecht daarbij grote waarde aan het reduceren van Galilei's inventiviteit. Cohen spreekt uitsluitend over toetsende experimenten, terwijl twee andere soorten experimenten eveneens in de *Discorsi* aanwezig zijn. Hetzelfde kan geoordeeld worden over McClellan & Dorn's benadering van Galilei's experimenten, met die toevoeging, dat zij niet uitsluitend spreken over toetsende, maar illustratieve experimenten. Dient er dan een vijfde Galilei aan de historiografie worden toegevoegd? Het antwoord op deze vraag is ja.

§5 Conclusie. Een vijfde Galilei

Dit paper centreerde rondom de vraag welke plaats en functie Galilei en zijn experimenten innemen in de geschiedenissen van Floris Cohen, Rienk Vermij, John Henry en James E. McClellan III & Harold Dorn, en de vraag hoe deze geschiedenissen zich verhouden tot de *Discorsi* zelf. Daarbij ben ik begonnen met een uiteenzetting van het concept 'Wetenschappelijke Revolutie,' door deze historici op verschillende wijze invulling gegeven. Cohen plaatst de Wetenschappelijke Revolutie in de zeventiende eeuw en deelt haar op in zes revolutionaire transformaties die gezamenlijk resulteerden in een vorm van natuurwetenschap die gekenmerkt wordt door een permanente dynamiek voorkomend uit een koppeling van intellectualisme en experiment. Vermij plaatst de Wetenschappelijke Revolutie eveneens in de zeventiende eeuw, maar ziet haar meer dan Cohen als een eenheid, namelijk als de overgang van het Aristotelische naar het Cartesiaanse wereldbeeld. Henry's Wetenschappelijke Revolutie vond plaats tussen 1500

⁴⁹ *Ibid.*, 137.

en 1700 en betekende een synthese tussen de universitaire natuurfilosofie en meer experimenteel en praktisch georiënteerde natuur-onderzoekende disciplines, zoals de magie en de wiskunde. McClellan & Dorn laten de Wetenschappelijke Revolutie tevens duren van 1500 tot 1700, maar hun geschiedenis concentreert zich voornamelijk op de astronomie en is dus minder omvattend dan de andere interpretaties.

Tegen deze achtergronden heb ik verschillende Galilei's beschreven. Cohens Galilei is samen met Kepler de kampioen van een eerste revolutionaire transformatie, die een realistische interpretatie van de wiskunde betekent. Vermij's Galilei is met zijn *Siderius nuncius* de grote baanbreker voor het Cartesiaanse universum, waarin kwalitatief homogene materie zich volgens vaste wetten door de ruimte voortbeweegt. Henry's Galilei is dankzij zijn schrijverstalent bovenal een bepleiter van de nieuwe realistisch-geïnterpreteerde wiskunde zonder zelf daadwerkelijk revolutionair te zijn geweest. McClellan & Dorns Galilei is net als Cohens Galilei een conceptueel revolutionair, de verbindingspersoon tussen Copernicus en Newton, maar geen toetsend experimentalist. Volgens Cohen is het daarentegen mede door de introductie van dit toetsende experiment dat gesproken mag worden van een eerste revolutionaire transformatie. Niemand was er voor Galilei in geslaagd de wiskunde aan de werkelijkheid te koppelen door middel van toetsende experimenten. Precies deze gedachte wordt door Henry bestreden. Net als Vermij, plaatst hij Galilei in een traditie van Italiaanse ingenieurs, de *mathematici*, en volgens Henry ontleende Galilei zijn experimentele werkwijze aan hun. Vermij bespreekt geen van Galilei's experimenten.

Na viermaal de rol en functie van Galilei en zijn experimenten in de Wetenschappelijke Revolutie inzichtelijk te hebben gemaakt, volgde een uiteenzetting en analyse van de *Discorsi*. Daartoe is gekozen twee passages uit het werk nauwkeurig te bestuderen. Hieruit bleek Galilei's herhaaldelijke pogingen opstellingen te ontwerpen om zijn leerstellingen aan te laten sluiten bij de zintuigelijke werkelijkheid. Daadwerkelijke natuurprocessen poogt hij te beschrijven of verklaren. Daarbij valt geregeld het woord 'experiment,' en het zijn deze experimenten die in dit paper zijn gecategoriseerd. Een eerste categorie experimenten is in navolging van Cohen toetsende experimenten genoemd. Deze experimenten, waarvan het valversnelling-experiment met de bronzen bal het beroemdste is, dienden als doel Galilei's theorieën of wetmatigheden te bevestigen. Wanneer een experiment een stelling echter kan bevestigen, kan een stelling eveneens experimenteel worden ontkracht. Zo wordt Aristoteles' eerste assumptie over verschillen in valsnelheden door Sagredo ontkracht door een experiment waarin hij twee ballen van een toren liet vallen. Daar Galilei van mening lijkt te zijn dat de waarschijnlijkheid van een leerstelling door een experiment kan worden bevestigd of ontkracht, kunnen deze experimenten met recht als toetsend worden beschreven.

Twee andere categorieën kunnen echter worden ontwaard. Een tweede categorie is in dit paper illustratief genoemd. Galilei's experiment met de pendule lijkt meer het karakter te hebben

van een gedachte-experiment, dan van een daadwerkelijk fysiek uitgevoerde beproeving. Interessant is dat dergelijke onderzoek nog steeds het doel dient de waarschijnlijkheid van een assumptie te vergroten: 'it will fall little short of equality with necessary demonstration,' zegt Salviati over de ingebeelde pendule. (205-6) Een derde categorie heeft een geheel andere bedoeling, namelijk een bepaalde eigenschap van de natuur door middel van een proefopstelling ontdekken. Deze categorie kan omschreven worden als opsporend, wederom in navolging van Cohen. Galilei's experimenten om de lucht te wegen of de kracht van een vacuüm te meten zijn hiervan voorbeelden. Deze experimenten hebben niet direct het doel de waarschijnlijkheid van een leerstelling te vergroten, maar uitspruiten uit nieuwsgierigheid, een drang de natuur te kennen en verklaren.

Wanneer deze drie categorieën experimenten vergeleken worden met de vier bestudeerde geschiedenis, moet geconcludeerd worden dat geen van de werken Galilei's experimentele werk volledig beschrijft. Vermij en Henry beschrijven Galilei's experimentele werk niet, respectievelijk summier. Cohen en McClellan & Dorn beschrijven slechts één van de drie categorieën en zien daarbij andere aspecten van Galilei's experimentele werk over het hoofd.

Waarom ik wil spreken van een vijfde Galilei? Precies daarom, dat door zijn experimenten niet volledig te beschrijven, aspecten van Galilei's denken buiten beschouwing worden gelaten. Door de *Discorsi* min-of-meer onbesproken te laten, negeert Vermij Galilei's meest revolutionaire stap, namelijk het ontwikkelen van een compleet nieuw concept van beweging. Ook voor Vermij's Wetenschappelijke Revolutie is dit van belang, omdat Galilei met dit begrip de Aristotelische kosmologie aantastte in haar fundament, namelijk beweging als de verwezenlijking van een doel. Bovendien betekenen Galilei's experimenten ter ondersteuning van zijn bewegingsleer dat er ook voor Descartes sprake was van een experimenteel onderzoek. Henry ziet Copernicus als eerste wiskundig realist, maar in dit paper is beargumenteerd waarom dit problematisch is. Copernicus' *De revolutionibus*, begrepen als 'a revolution-making rather than a revolutionary text,' maakt daarentegen plaats voor een revolutionaire Galilei die samen met Kepler de wiskunde als eerste realistisch ging interpreteren. Met deze realistische interpretatie zijn zijn experimenten onlosmakelijk verbonden: als wiskunde over de werkelijkheid gaat, dan moeten wiskundige beschrijvingen getest worden. McClellan & Dorn beschrijven Galilei's conceptuele vernieuwingen uitvoerig, maar ontkennen het toetsende karakter van zijn experimenten. Daadwerkelijk toetsende experimenteel onderzoek werd volgens het tweetal in de zeventiende eeuw überhaupt nog niet ondernomen. Daarmee gaan ze mijns inziens voorbij aan Galilei's overtuiging dat filosofische of wiskundige beweringen wel degelijk getest kunnen worden, zoals hijzelf Aristoteles' beweringen zintuigelijk experimenteel tegen het licht hield.

Tot slot, Cohens Galilei. Cohen schrijft, overigens terecht, belangrijke conceptuele en methodische vernieuwingen toe aan Galilei, mogelijk hadden de verdieping en verbreding van de Alexandrijnse kennisstructuur zich zelfs niet voorgedaan zonder zijn genialiteit. De vraag kan

echter gesteld worden of Galilei louter een *beschrijvend* Alexandrijn was en niet tevens, als een “Athener,” geïnteresseerd was in het verklaren van bepaalde natuurfenomenen. Omschreef Galilei zijn bestaan niet als dat van een wiskundig *filosoof*? Door de geschiedenis te analyseren door een strak theoretisch raamwerk, wordt de diversiteit van de historische werkelijkheid gereduceerd. Dit is onvermijdelijk, maar dat betekent niet dat we een zo compleet mogelijke beeld van het verleden behoren te schetsen. Concreet, in het geval van een analyse van de persoon Galilei, betekent dit dat de Italiaan niet alleen wiskundige wetmatigheden toepaste om bewegingen te beschrijven, maar tevens *vacuüm-verklaringen* aandroeg waarom objecten eigenlijk niet uit elkaar vallen. Hoewel het niet de bedoeling is in een conclusie, een ander voorbeeld: Galilei *verklaart* het feit dat ijzer vloeibaar wordt nadat het heet is gemaakt door middel van zeer kleine vuurdeeltjes, die de vacuümverbindingen tijdelijke binnendringen. (66-8) Galilei’s opsporende experimenten zijn hiermee verbonden, omdat zij eveneens voortkomen uit een ontembare drang de natuur te kennen. Hoe sterk is een vacuüm eigenlijk? Wat weegt lucht? Wanneer de *Discorsi* wordt gelezen, ontdekt men een bijzonder enthousiast, vernuftig en vindingrijk natuuronderzoeker met een zeer brede interesse in de natuur, verschillende experimentele praktijken beproevend om haar grilligheden en enigma’s te doorgronden. Dit althans, is de vijfde Galilei die ik heb leren kennen.

Geraadpleegde literatuur

Cohen, F. *De herschepping van de wereld. het ontstaan van de moderne natuurwetenschap verklaard.* Amsterdam: Bert Bakker (Prometheus), 2007.

Galilei, G. *Two new sciences. Including Centres of gravity & Force of percussion.* Translated, with introduction and notes, by Stillman Drake. Wisconsin: The University of Wisconsin Press, 1974.

Henry, J. *The Scientific Revolution and the origins of modern science.* Basingstoke / New York: Palgrave MacMillan, 2008.

McClellan, J., en Dorn, H. *Science and technology in world history. An introduction.* Baltimore: Johns Hopkins UP, 1999.

Vermij, R. *Kleine geschiedenis van de wetenschap.* Amsterdam: Nieuwezijds, 2006.

Illustratieverantwoording

Afb. 1 is door mij overgenomen uit: Galilei, *Two new sciences*, 164 (*Opere*, VIII (207)).