

Radboud Universiteit



Determinisme en (On)voorspelbaarheid

DE VERSCHUIVING VAN HET LAPLACIAANS DETERMINISME

Auteur:

Fleur HUBAU

Scriptiebegeleider:

Marij VAN STRIEN

Studentnummer:

1120668

Aantal woorden:

14.786

SCRIPTIE TER VERKRIJGING VAN DE GRAAD "MASTER OF ARTS" IN DE FILOSOFIE
AAN DE RADBOUD UNIVERSITEIT NIJMEGEN

27 juni 2025

Hierbij verklaar en verzeker ik, Fleur Hubau, dat voorliggende eindwerkstuk getiteld “Determinisme en (On)voorspelbaarheid”, zelfstandig door mij is opgesteld, dat geen andere bronnen en hulpmiddelen dan die door mij zijn vermeld zijn gebruikt en dat de passages in het werk waarvan de woordelijke inhoud of betekenis uit andere werken — ook elektronische media — is genomen door bronvermelding als ontlening kenbaar gemaakt worden. Nijmegen, 27 juni 2025.

Samenvatting

Determinisme en (On)voorspelbaarheid

door Fleur HUBAU

Het Laplaciaans determinisme stelt dat de toestand van het universum volledig bepaald is. In de bekende definitie van Laplace hangt determinisme nauw samen met voorspelbaarheid, terwijl determinisme in een hedendaags perspectief los van voorspelbaarheid gedefinieerd wordt. Hoe is deze verschuiving tot stand gekomen? Via het werk van Poincaré en Popper worden twee verschillende perspectieven op determinisme duidelijk. Geconfronteerd met onvoorspelbaarheid, beschouwde Poincaré determinisme als een aanname in de wetenschap. Popper daarentegen definieerde determinisme in termen van het epistemologische begrip voorspelbaarheid. Beide auteurs verwijzen naar de gevoelige afhankelijkheid van begincondities, een fenomeen dat tegenwoordig centraal staat in de moderne chaostheorie. In het licht van deterministische chaos wordt uiteindelijk duidelijk dat determinisme en voorspelbaarheid volledig uit elkaar gegroeid zijn.

Inhoudsopgave

Samenvatting

Inhoudsopgave

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Inleiding | 1 |
| 1.1 | Het Laplaciaans determinisme | 2 |
| 1.2 | Hedendaags determinisme: Earman en Butterfield | 3 |
| 1.3 | Onderzoeksvraag, aanpak en inhoud | 5 |
| 2 | Het determinisme van Laplace | 8 |
| 2.1 | Een eenvoudige voorspelling | 8 |
| 2.2 | Regulariteit van de hemelmechanica | 11 |
| 2.3 | Het principe van voldoende grond | 13 |
| 2.4 | Zekerheid en waarschijnlijkheid | 16 |
| 2.4.1 | De formule van Laplace | 16 |
| 2.4.2 | Kans als subjectieve aangelegenheid | 17 |
| 2.5 | Conclusie | 18 |
| 3 | Determinisme à la Poincaré | 20 |
| 3.1 | Gevoelige afhankelijkheid van begincondities | 21 |
| 3.1.1 | De stabiliteit van het zonnestelsel | 23 |
| 3.2 | Natuurwetten als benaderingen in de wetenschap | 26 |
| 3.3 | Conclusie | 29 |
| 4 | Popper en praktische (on)voorspelbaarheid | 31 |
| 4.1 | Poppers ‘wetenschappelijk’ determinisme | 32 |
| 4.1.1 | Metafysisch, religieus en ‘wetenschappelijk’ determinisme | 32 |
| 4.1.2 | Het Laplaciaans versus het ‘wetenschappelijk’ determinisme | 34 |
| 4.1.3 | De puntmassa van Hadamard | 36 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 4.2 | Bespreking | 38 |
| 4.3 | Conclusie | 39 |
| 5 | Deterministische chaos | 41 |
| 5.1 | Een deterministisch onvoorspelbaar systeem | 42 |
| 5.2 | Poincaré en de gevoelige afhankelijkheid van begincondities | 43 |
| 5.3 | De Lorenzvergelijkingen | 45 |
| 5.4 | Chaos definiëren | 49 |
| 5.5 | Chaos en onvoorspelbaarheid | 50 |
| 5.6 | Conclusie | 51 |
| 6 | Conclusie | 53 |

Hoofdstuk 1

Inleiding

Plus que le passé et le présent, c'est l'avenir qui préoccupe les hommes.^{1,2}

— Krzysztof Pomian, *La Querelle du Déterminisme*

De mens probeert al eeuwen om inzicht te krijgen in de wereld om zich heen. Van de beweging van de hemellichamen tot het weer van morgen: de wetenschap heeft sinds haar ontstaan gezocht naar methodes om de natuur te begrijpen — én te voorspellen. Wie met succes kan voorspellen wat nog niet gebeurd is, wekt immers de indruk iets fundamenteels te begrijpen van hoe de wereld werkt. Voorspelling is daarom een epistemologische toetssteen: ze verleent geloofwaardigheid aan wetenschappelijke kennis. Een geslaagde voorspelling lijkt de ultieme bevestiging dat een theorie of model het juiste beeld van de werkelijkheid biedt.³

Een cruciale aanname achter deze logica is dat gebeurtenissen niet het gevolg zijn van een samenloop van toevalligheden. Er wordt verondersteld dat het universum deterministisch verloopt; dat wil zeggen, volgens vaste, regelmatige wetten. Impliceert een deterministische wereld noodzakelijk dat de toekomst volledig voorspelbaar is? Als de wereld deterministisch is, dan ligt de toekomst vast en lijkt het op het eerste gezicht mogelijk om haar met voldoende kennis exact te voorspellen.

De klassieke mechanica, geworteld in de Newtoniaanse natuurkunde, werd lange tijd beschouwd als het toonbeeld van determinisme én voorspelbaarheid. Het voorspellende succes van dit raamwerk, bijvoorbeeld in de astronomie, bracht veel

1. Krzysztof Pomian, "Le Déterminisme: Histoire d'une Problématique", in *La Querelle du Déterminisme: Philosophie de la Science d'aujourd'hui*, geredigeerd door Krzysztof Pomian (Parijs: Gallimard, 1990), 11.

2. "Meer dan het verleden of het heden, is het de toekomst die de mens bezighoudt."

3. Pomian, "Le Déterminisme: Histoire d'une Problématique", 11.

filosofen en wetenschappers ertoe om een wereldbeeld aan te nemen waarin alles via universeel geldige natuurwetten verliep. Enkel een gebrek aan voldoende data of kennis van de natuurwetten kon voorspelling dwarsbomen. Met andere woorden, in dit wereldbeeld zouden alle gebeurtenissen voorspelbaar moeten zijn. Uit de voorspelbaarheid van deterministische systemen en het geloof dat alle systemen in de natuur deterministisch zijn, volgde logisch dat alle systemen in de natuur voorspelbaar zijn.⁴

1.1 Het Laplaciaans determinisme

Het idee dat gebeurtenissen in de wereld volledig bepaald zijn, werd treffend uitgedrukt door de Franse wiskundige en astronoom Pierre-Simon Laplace (1749-1827). Hoewel Laplace het woord 'determinisme' zelf niet gebruikte, staat de volgende beroemde passage uit *Essai Philosophique sur les Probabilités* (1814) vandaag bekend als het Laplaciaans determinisme.^{5,6}

Given for one instant an intelligence which could comprehend all the forces by which nature is animated and the respective situation of the beings who compose it — an intelligence sufficiently vast to submit these data to analysis — it would embrace in the same formula the movements of the greatest bodies of the universe and those of the lightest atom; for it, nothing would be uncertain and the future, as the past, would be present to its eyes.⁷

In het Laplaciaans determinisme wordt gesteld dat toekomst en verleden volledig bepaald zijn. Laplace stelde zich hierbij een intellect — vaak aangeduid als 'de demon van Laplace' — voor dat alle toestanden van het universum met absolute zekerheid zou kunnen berekenen. Exacte voorspellingen zijn dus niet *praktisch* mogelijk, maar *in principe* via het idee van een hypothetische alwetende intelligentie.

Volgens Laplace, die uitgaat van een volledig gedetermineerde wereld, volgen toestanden elkaar noodzakelijk op. Het Laplaciaans determinisme is daarmee een

4. Mark A. Stone, "Chaos, Prediction and Laplacean Determinism", *American Philosophical Quarterly* 26, no. 2 (1989): 123.

5. Ian Hacking, "Nineteenth Century Cracks in the Concept of Determinism", *Journal of the History of Ideas* 44, no. 3 (1983): 460.

6. Pierre-Simon Laplace, *Essai Philosophique sur les Probabilités* (Paris: Courcier, 1814).

7. Pierre-Simon Laplace, *A Philosophical Essay on Probabilities*, vertaald door Frederick Lincoln Emory en Frederick Wilson Truscott (New York: Dover Publications, 1951), 4.

ontologische stelling over de wereld zoals die is, onafhankelijk van het menselijk kennen. Daarnaast heeft het Laplaciaans determinisme een sterke epistemologische connotatie vanwege de link met voorspelbaarheid op basis van exacte kennis van begincondities en natuurwetten. In de definitie van Laplace zit immers het idee dat zowel toekomst als verleden kenbaar of voorspelbaar zijn door een alwetende intelligentie.

1.2 Hedendaags determinisme: Earman en Butterfield

Vanuit een hedendaags perspectief heeft het filosofische begrip van determinisme deze connectie met voorspelbaarheid verloren. De moderne opvatting van determinisme is dat de huidige toestand van de wereld volledig bepaalt hoe de toekomst zal verlopen. Met andere woorden: er is maar één uitkomst mogelijk.⁸ Deze moderne opvatting wordt bijvoorbeeld door natuurkundig filosofen John Earman (1942) en Jeremy Butterfield (1954) verdedigd.

In *A Primer on Determinism*⁹ (1986) stelt Earman dat, gegeven een verzameling van alle fysisch mogelijke werelden \mathscr{W} , het Laplaciaans determinisme als volgt geformuleerd kan worden (' \in ' stelt 'element van' voor):

The world $W \in \mathscr{W}$ is Laplacian deterministic just in case for any $W' \in \mathscr{W}$,
if W and W' agree at any time, then they agree for all times.¹⁰

In tegenstelling tot het Laplaciaans determinisme, waar een alwetende intelligentie zowel toekomst als verleden voor het geestesoog ziet verschijnen, is in de definitie van Earman geen enkele link naar voorspelbaarheid aanwezig. Earman gebruikt in de plaats een concept van fysisch mogelijke werelden, die hij definieert als mogelijke vierdimensionale ruimte-tijd werelden waarin dezelfde natuurwetten gelden als in 'onze' eigenlijke wereld. Deze werelden komen overeen indien alle relevante fysische eigenschappen, zoals de posities en snelheden van deeltjes, gelijk zijn. Wanneer dit het geval is voor een bepaalde tijd, zou dat ook voor alle andere tijden het geval moeten zijn.¹¹

8. Thomas Müller en Tomasz Placek, "Defining Determinism", *The British Journal for the Philosophy of Science* 69, no. 1 (2018): 219.

9. John Earman, *A Primer on Determinism* (Dordrecht: D. Reidel Publishing Company, 1986).

10. Earman, 13.

11. Earman, 5.

De definitie van Earman is, net zoals die van Laplace, volledig ontologisch, met dat verschil dat Earmans definitie geen epistemologische connotaties heeft. Voor Earman is determinisme een ontologische doctrine, waar kennisafhankelijke begrippen als voorspelbaarheid geen enkele rol in spelen. Earman doet dit bewust: de scheiding tussen voorspelbaarheid en determinisme is volgens hem cruciaal om determinisme te kunnen verdedigen. Earman schrijft:

It could be replied that the intent of Laplace's definition is in the right direction and all that needs to be done is to cleanse it of any reference to a predictor. I applaud this sentiment, but I would go even further in recommending that the notion of prediction with all of its epistemological connotations be dropped altogether. The history of philosophy is littered with examples where ontology and epistemology have been stirred together into a confused and confusing brew.¹²

Volgens Earman moet een correcte definitie van determinisme betrekking hebben tot de onderliggende structuur van de wereld, niet zozeer van onze kennis erover.¹³ Hoewel determinisme wel degelijk epistemologische implicaties heeft (zoals bijvoorbeeld het mogelijk maken van voorspellingen), hoeven deze geen onderdeel te zijn van het begrip zelf. Earman stelt daarom "let us not confuse the implications of the doctrine with the doctrine itself".¹⁴

In Butterfields paper *Determinism and Indeterminism*¹⁵ (2005) is een zelfde ontologische inslag te onderscheiden. Anders dan Earman spreekt Butterfield echter niet over mogelijke werelden die op een bepaalde tijd t gelijk zijn in alle relevante aspecten, maar over overeenkomende modellen. Hiermee probeert hij om Earmans idee van 'overeenkomst' van werelden preciezer te maken. Butterfield definieert een model als een opeenvolging van toestanden die volgens de wetten van een bepaalde theorie tot stand komen. Aangezien modellen in termen van theorieën worden beschreven, is determinisme bij Butterfield vooral een eigenschap van een theorie.¹⁶

¹². Earman, *A Primer on Determinism*, 7.

¹³. Earman, 7.

¹⁴. Earman, 8.

¹⁵. Jeremy N. Butterfield, "Determinism and Indeterminism", *Routledge Encyclopedia of Philosophy* 3 (2005): 33–39.

¹⁶. Butterfield, 35.

Een theorie is volgens Butterfield deterministisch indien twee van haar modellen overeenkomende doorsnedes bevatten en indien vervolgens alle corresponderende toekomstige doorsnedes eveneens overeenkomend zijn.¹⁷ Een nuttige analogie hierbij is een frame uit een filmopname: één frame is een ‘doorsnede’ van een film, ofwel de toestand op een bepaald moment. Als twee dezelfde films (modellen) gestart worden op hetzelfde moment, dan zullen alle volgende frames overeenkomend zijn.

Hoewel beide auteurs andere bewoordingen gebruiken, drukken Earman en Butterfield eenzelfde idee uit wat betreft determinisme. Bij beide staat centraal dat, gegeven de huidige toestand, er maar één uitkomst mogelijk is, ofwel: systemen evolueren op een unieke manier. Deze gedachte is eveneens in het Laplaciaans determinisme te vinden, met dat verschil dat bij Earman en Butterfield geen enkele notie van voorspelbaarheid aanwezig is. Er is dus een verschuiving te zien ten opzichte van Laplace: waar het Laplaciaans determinisme *in principe* voorspelbaarheid centraal stelt, wordt determinisme in een hedendaagser licht gedefinieerd in termen van mogelijke werelden of modellen en hun unieke evolutie, los van voorspelbaarheid.

1.3 Onderzoeksvraag, aanpak en inhoud

Het Laplaciaans determinisme is een ontologische stelling over de wereld, waarin het epistemologische begrip voorspelbaarheid een grote rol speelt. In hedendaagse formuleringen van determinisme wordt een puur ontologische definitie gegeven, zonder de connotatie met voorspelbaarheid. Determinisme, wat bij Laplace *in principe* voorspelbaarheid impliceert, wordt vandaag begrepen als de unieke evolutie van mogelijke werelden of modellen zoals te zien was bij Earman en Butterfield. Waarom is voorspelbaarheid verdwenen uit de hedendaagse formuleringen van determinisme?

Daarnaast wordt vastgesteld dat voorspelbaarheid in de bestaande literatuur sterk geproblematiseerd wordt door deterministische chaos. Specifieker wordt in filosofische literatuur van eind 20^e en begin 21^e eeuw gesteld dat de opkomst van de chaostheorie verantwoordelijk is voor het uiteengaan van determinisme

¹⁷. Butterfield, “Determinism and Indeterminism”, 37.

en voorspelbaarheid.^{18,19,20,21} Deze theorie beschrijft dynamische systemen die deterministisch zijn, i.e. systemen die volgens vastgestelde (wiskundige) wetten van de ene naar de andere toestand overgaan. De fysische evolutie van zulke systemen hangt echter sterk af van de begincondities. Aangezien fysische metingen nooit oneindig precies kunnen zijn, wordt voorspelling met een willekeurig kleine fout onmogelijk. In "Chaos, Prediction and Laplacean Determinism" (1989) schrijft auteur M. A. Stone bijvoorbeeld "(...) chaotic systems, even though they are deterministic, are not predictable (they are not epistemically deterministic)".²² Op welke manier kan determinisme begrepen worden als chaotische systemen deterministisch zijn, maar niet voorspelbaar? Verliest het Laplaceaans determinisme dan volledig zijn betekenis, of is er toch een parallel te trekken met het hedendaagse perspectief op determinisme?

Naar aanleiding van deze vragen, staat in dit werk de volgende onderzoeksvraag centraal:

**Hoe is de samenhang tussen determinisme en voorspelbaarheid
(ontologisch en epistemologisch) verschoven sinds Laplace?**

Deze vraag wordt in de volgende hoofdstukken als volgt onderzocht. Allereerst wordt in Hoofdstuk 2 de samenhang tussen determinisme en voorspelbaarheid bekeken in de stelling van Laplace. Geïnspireerd door het succes van de Newtoniaanse mechanica gaat Laplace uit van een absoluut determinisme; in een volledig gedetermineerde wereld volgen toestanden elkaar noodzakelijk op. Dit wijst op een ontologisch determinisme. Hoewel exacte voorspellingen in theorie mogelijk zijn, wijst Laplace op praktische beperkingen. Het wordt duidelijk dat de voorspelbaarheid waar Laplace over schrijft een voorspelbaarheid *in principe* is.

De *in principe* voorspelbaarheid van Laplace wordt in Hoofdstuk 3 naast het determinisme van Henri Poincaré (1854-1912) gelegd. Poincaré was één van de eerste auteurs die expliciet wees op de onvoorspelbaarheid van fenomenen. Bij Poincaré wordt de relatie tussen determinisme en voorspelbaarheid daarom

18. G. M. K. Hunt, "Determinism, Predictability and Chaos", *Analysis* 47, no. 3 (1987): 129–133.

19. Stone, "Chaos, Prediction and Laplacean Determinism".

20. Harald Atmanspacher, "Determinism is Ontic, Determinability is Epistemic", in *Between Chance and Choice: Interdisciplinary Perspectives on Determinism*, geredigeerd door Harald Atmanspacher en Robert Bishop (Exeter: Imprint Academic, 2002), 49–74.

21. Robert Bishop, "On Separating Predictability and Determinism", *Erkenntnis* 58, no. 2 (2003): 169–188.

22. Stone, "Chaos, Prediction and Laplacean Determinism", 128.

problematischer. Desondanks blijft Poincaré vasthouden aan determinisme, zij het op een ander manier dan Laplace. Poincaré verdedigt determinisme als een aanname binnen de wetenschap; hoewel begincondities en natuurwetten slechts bij benadering gekend kunnen zijn, wordt de wetenschap gedreven door het geloof dat steeds betere voorspellingen mogelijk zijn.

In Hoofdstuk 4 wordt besproken hoe Karl Popper (1902-1994), één van de grootste wetenschapsfilosofen van de 20^e eeuw, tot een empirische versie van Laplaces determinisme komt. In het ‘wetenschappelijk determinisme’ van Popper wordt de *in principe* voorspelbaarheid van Laplace gereduceerd tot een probleem van praktische voorspelbaarheid. Net als Poincaré wijkt Popper sterk af van het Laplaciaans determinisme, maar in tegenstelling tot bij Poincaré leidt de onvoorspelbaarheid van de klassieke natuurkunde bij Popper tot indeterminisme. In Poppers redenering zit het idee dat als voorspelling faalt, determinisme dat ook doet.

In Hoofdstuk 5 wordt beschreven hoe door de opkomst van de chaostheorie de link tussen determinisme en voorspelbaarheid volledig doorbroken wordt. De chaostheorie werd rond 1960 gepopulariseerd door meteoroloog Edward Lorenz (1917-2008). Systemen die een gevoelige afhankelijkheid van begincondities vertonen, een fenomeen dat resulteert in onvoorspelbaarheid en waar zowel Poincaré als Popper naar verwijzen, worden tegenwoordig chaotische systemen genoemd. Bij deterministische chaos — een begrip dat veel weg heeft van een oxymoron — gaan determinisme en voorspelbaarheid helemaal uit elkaar. Er wordt duidelijk dat voorspelbaarheid en determinisme in de chaostheorie terminologisch onderscheiden worden; voorspelbaarheid wordt opgevat als een epistemologisch begrip en determinisme als een ontologisch begrip.

Hoofdstuk 2

Het determinisme van Laplace

Laplace schrijft over een alwetende intelligentie die zowel toekomst als verleden kan voorspellen op basis van de natuurwetten en exacte kennis van de begintoestand van alle deeltjes in het universum. De menselijke geest komt met zijn beperkingen echter niet in de buurt van de demon van Laplace, waardoor voorspellingen in de praktijk kunnen falen. Hoe hangen determinisme en voorspelbaarheid samen in het Laplaciaans determinisme?

Om deze samenhang te begrijpen, wordt in Sectie 2.1 met een eenvoudig voorbeeld geïllustreerd hoe voorspellingen in de klassieke mechanica tot stand kunnen komen. Vervolgens wordt in Sectie 2.2 aangetoond dat Laplace voor zijn determinisme werd geïnspireerd door zijn werk in de hemelmechanica en de mogelijkheden tot voorspelling in de astronomie. In de laatste twee secties wordt duidelijk hoe de *in principe* voorspelbaarheid van Laplace begrepen kan worden. In Sectie 2.3 wordt gesteld dat het determinisme van Laplace gefundeerd is in het principe van voldoende grond, waardoor zijn determinisme ontologisch is. Tegelijk is Laplace zich bewust van een beperking op het menselijk kennen (Sectie 2.4), waardoor waarschijnlijkheden nodig zijn in een volledig gedetermineerde wereld.

2.1 Een eenvoudige voorspelling

Herinneren we ons de uitdrukking van het Laplaciaans determinisme, zoals door Laplace geformuleerd in *Essai Philosophique sur les Probabilités* (1814):

Given for one instant an intelligence which could comprehend all the forces by which nature is animated and the respective situation of the beings who compose it — an intelligence sufficiently vast to submit these

data to analysis — it would embrace in the same formula the movements of the greatest bodies of the universe and those of the lightest atom; for it, nothing would be uncertain and the future, as the past, would be present to its eyes.^{1,2}

Zoals te lezen in bovenstaand citaat, zijn de nodige voorwaarden voor het Laplaciaans determinisme dat de natuurwetten en de gehele toestand op een bepaald moment gekend zijn. Laplace noemt deze toestand “de respectievelijke situatie” van alle entiteiten in de natuur, waarmee de grootste lichamen en de lichtste atomen in het universum bedoeld worden³. Hoewel deze frase enkel op de positie van objecten lijkt te duiden, wordt “de respectievelijke situatie” doorgaans geïnterpreteerd als ‘begintoestand’. Aangezien Laplace het over de beweging van deeltjes heeft, zijn zowel de positie als de snelheid relevant. De begintoestand beschrijft dan de positie en de snelheid van alle deeltjes op een bepaald moment, waarmee met behulp van de relevante natuurwetten hun beweging voorspeld kan worden.

Een voorbeeld uit de klassieke mechanica maakt duidelijker hoe een voorspelling tot stand kan komen op basis van de begintoestand en de relevante natuurwet. Stel bijvoorbeeld dat een bal naar beneden gegooid wordt vanaf de top van een 70 meter hoge toren. De opdracht is om te voorspellen waar die zich na 3 seconden bevindt. De luchtweerstand mag verwaarloosd worden.⁴

De bal vertrekt vanuit rust, dus de begintoestand is $x_0 = 0$ en $v_0 = 0$.⁵ De relevante natuurwet die nodig is om de beweging van de bal te beschrijven, kan uitgedrukt worden door de formule

$$x = v_0 t + \frac{1}{2} a t^2. \quad (2.1)$$

1. Laplace, *A Philosophical Essay on Probabilities*, 4.

2. “Une intelligence qui, pour un instant donné, connaîtrait toutes les forces dont la nature est animée, et la situation respective des êtres qui la composent, si d’ailleurs elle était assez vaste pour soumettre ces données à l’analyse, embrasserait dans la même formule les mouvemens des plus grands corps de l’univers et ceux du plus léger atome: rien ne serait incertain pour elle, et l’avenir comme le passé, serait présent à ses yeux.” Laplace, *Essai Philosophique sur les Probabilités*, 4.

3. In de originele Franse tekst van Laplace wordt dit aangeduid als “la situation respective” van “des plus grands corps de l’univers et ceux du plus léger atome” (Laplace, 4).

4. Voorbeeld uit Giancoli (2014), pp. 38-39.

5. Het assenstelsel wordt zo gekozen dat $x_0 = 0$ op de plaats waar de bal losgelaten wordt.

Deze vergelijking uit de kinematica beschrijft de beweging van een voorwerp met een constante versnelling a door de tijd t , gegeven de beginpositie x_0 en de beginsnelheid v_0 .

Gebruik makende van het feit dat een vallend voorwerp onderhevig is aan een constante versnelling van $9,8 \text{ m/s}^2$ (de gemiddelde valversnelling op aarde) en dat de bal vanuit rust vertrekt ($v_0 = 0$), komt dat neer op

$$x = 0 + \frac{1}{2} \times 9,8 \text{ m/s}^2 \times (3 \text{ s})^2 = 44,1 \text{ m.} \quad (2.2)$$

Uit de berekening blijkt dat de bal na 3 seconden een afstand van 44,1 meter heeft afgelegd. Aangezien de toren 70 meter hoog is, is het uiteindelijke resultaat van de voorspelling dat de bal zich na 3 seconden op een hoogte van 25,9 meter boven de grond zal bevinden.

In het voorbeeld werd een voorspelling gedaan voor een tijd $t' = 3$. In zekere zin kan ook gezegd worden dat 'terugrekening' naar het verleden mogelijk is. Wat als 'heden' geldt is immers relatief. Stel het huidige moment voor als de situatie op $t' = 3$, wanneer de bal al 44,1 meter naar beneden is gevallen, dan is elke tijd vóór deze tijd aan te duiden als 'verleden'. Gebruik van dezelfde methode als eerder leert dan dat de bal zich een seconde eerder ($t'' = 2$) zo'n 25 meter hoger bevond⁶. Zowel 'toekomst' als 'verleden' (relatieve begrippen) kunnen dus worden berekend op basis van de begintoestand.

Bovenstaand voorbeeld uit de kinematica liet zien hoe een rekenaar via wiskundige analyse met een formule en correcte data tot een voorspelling komt over de positie van een voorwerp. De omstandigheden waren echter eenvoudig; we beschouwden slechts één voorwerp en omgevingsfactoren zoals wrijving werden verwaarloosd. Ook werd aangenomen dat de begincondities met exacte nauwkeurigheid gegeven werden. Het moge duidelijk zijn dat de demon van Laplace een grotere taak heeft. Exacte kennis en wiskundige analyse van *alle* initiële data (de begincondities) stelt de hypothetische intelligentie van Laplace in staat om de toestand van het *gehele* universum te berekenen.

⁶. $x = \frac{1}{2} \times 9,80 \text{ m/s}^2 \times (2,00 \text{ s})^2 = 19,60 \text{ m}$. Het verschil tussen beide tijdstippen $t'' = 2$ en $t' = 3$ is dus ongeveer 25 meter.

2.2 Regulariteit van de hemelmechanica

De hypothetische intelligentie waarover Laplace schrijft, is in staat om zekerheid te verkrijgen over de vroegere en toekomstige posities van de grootste lichamen en de lichtste atomen in het universum. De grootste lichamen in het universum zijn ongetwijfeld de hemellichamen. Deze bestudeerde Laplace eerder uitgebreid in *Traité de Mécanique Céleste*. In dat werk, verschenen in meerdere delen tussen 1799 en 1825, stelde Laplace zich tot doel om de geobserveerde bewegingen van hemellichamen te verklaren.⁷ Laplace trachtte, zo leest een analyse van tijdsgenoot Jean-Baptiste Biot, om de losse ontdekkingen van zijn voorgangers te verzamelen en te systematiseren.⁸

Laplace's meest belangrijke voorganger is ongetwijfeld Newton (1643-1727), die in zijn hoofdwerk *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica* (1687) de universele zwaartekrachtswet afgeleid had. Met dat werk, ook wel bekend als de *Principia*, had Newton de natuurwetenschappen een nieuwe richting gegeven met het formuleren van zijn beroemde bewegingswetten. Deze staan vandaag bekend als de wetten van Newton en vormen de grondslag van de klassieke mechanica.⁹

Laplace bouwde verder op het werk van Newton. Daarom wordt hij vandaag nog steeds "Newton de la France" (de Franse Newton) genoemd.¹⁰ In *Traité de Mécanique Céleste* probeerde Laplace in navolging van Newton de bewegingen van hemellichamen nauwkeurig te bepalen vanuit het principe van de zwaartekracht. Hij wilde aantonen dat men vanuit dit principe astronomische fenomenen tot in detail kon begrijpen. Zo leidde hij onder andere de invloed van de planeet Jupiter af op de baan van Saturnus.¹¹

Het mag daarom geen verrassing heten dat Laplace in zijn *Essai Philosophique sur les Probabilités* steunt op de noodzakelijke beweging van hemellichamen om ook aardse verschijnselen te verklaren. Laplace lijkt ervan overtuigd dat de alledaagse wereld zich laat beschrijven met dezelfde noodzakelijkheid als de hemellichamen. Wat

7. Amy Dahan Dalmedico, "Le Déterminisme de Pierre-Simon Laplace et le Déterminisme Aujourd'hui", in *Chaos et Déterminisme*, geredigeerd door A. Dahan Dalmedico, J.-L. Chabert en K. Chemla (Parijs: Éditions du Seuil, 1992), 373.

8. Jean-Baptiste Biot, *Analyse du Traité de Mécanique Céleste de P. S. Laplace* (Parijs: Duprat, 1800), 2.

9. Andrew Janiak, "Newton's Philosophy", in *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, Fall 2021, geredigeerd door Edward N. Zalta (Metaphysics Research Lab, Stanford University, 2021).

10. Dahan Dalmedico, "Le Déterminisme de Pierre-Simon Laplace et le Déterminisme Aujourd'hui", 372.

11. Jacques Laskar, "La Stabilité du Système Solaire", in *Chaos et Déterminisme*, geredigeerd door A. Dahan Dalmedico, J.-L. Chabert en K. Chemla (Parijs: Éditions du Seuil, 1992), 175.

hij in zijn beroemde stelling lijkt te doen, is de zekerheid van de hemelmechanica uitbreiden naar de wereld van alledag. Deze overtuiging komt duidelijk naar voren in de volgende passage:

All events, even those which on account of their insignificance do not seem to follow the great laws of nature, are a result of it just as necessarily as the revolutions of the sun.¹²

De mogelijkheden tot voorspelling die de astronomie bood waren opvallend. Niet alleen sterren en planeten vertoonden een regelmatige beweging; dat bleek ook het geval bij andere astronomische fenomenen. Neem bijvoorbeeld de periodieke komeet Halley, een hemelverschijnsel dat om de zoveel jaar vanop aarde te zien is. Laplace beschrijft hoe Frans wiskundige en astronoom Clairaut erin slaagde om de volgende passage van de komeet exact te berekenen. Door rekening te houden met de baanafwijkingen veroorzaakt door grote planeten zoals Jupiter en Saturnus, voorspelde hij het tijdstip van passage in 1759 exact. De voorspelling van Clairaut werd door observatie bevestigd. Laplace schrijft: “The regularity which astronomy shows us in the movements of the comets doubtless exists also in all phenomena.”¹³ Omwille van de sterk aanwezige regulariteit die Laplace kon vaststellen voor de grootste lichamen van het universum, ligt ook voorspelbaarheid van de lichtste atomen voor de hand. Het is aannemelijk dat Laplace zich door dit idee liet inspireren bij het formuleren van zijn stelling.

Ondanks de waargenomen regelmatigheid in de hemelmechanica is Laplace zich in *Essai Philosophique sur les Probabilités* bewust van een essentieel verschil tussen menselijke kennis en de kennis van de hypothetische intelligentie. In wat volgt, wordt aangetoond dat Laplace het over een *in principe* voorspelbaarheid had. Aan de hand van het principe van voldoende grond en zijn werk in de kansrekening, wordt duidelijk dat Laplace een *in principe* mogelijkheid tot voorspelling naar voren brengt, de *praktische* onmogelijkheid ervan illustrerend met de alwetende intelligentie waarvan sprake.

¹². Laplace, *A Philosophical Essay on Probabilities*, 3.

¹³. Laplace, 6.

2.3 Het principe van voldoende grond

Laplace kan beschouwd worden als een absolute determinist, in die zin dat toekomst en verleden volgens hem volledig bepaald zijn. Alvorens hij zijn formulering van determinisme geeft, stelt Laplace: “We ought then to regard the present state of the universe as the effect of its anterior state and as the cause of the one which is to follow”.¹⁴ Het idee dat de vorige toestand de volgende veroorzaakt, is nauw verbonden met het principe van voldoende grond.

Het ‘principe van voldoende grond’ (*principle of sufficient reason*) brengt Laplace in *Essai Philosophique sur les Probabilités* als volgt naar voren:

Present events are connected with preceding ones by a tie based upon the evident principle that a thing cannot occur without a cause which produces it. This axiom, known by the name of the principle of sufficient reason, extends even to actions which are considered indifferent; the freest will is unable without a determinative motive to give them birth; if we assume two positions with exactly similar circumstances and find that the will is active in the one and inactive in the other, we say that its choice is an effect without a cause. It is then, says Leibniz, the blind chance of the Epicureans.¹⁵

In bovenstaande passage refereert Laplace expliciet naar het principe van voldoende grond, door uit te leggen dat er steeds een verbinding te vinden is tussen de toestand van de wereld op een bepaald moment en die op het daaropvolgende moment. De oorzaak (*cause*) is de toestand op een eerder moment en die produceert de volgende toestand volgens het principe van voldoende grond. De volgende toestand wordt dus volledig bepaald door de vorige.

Laplace verwijst in bovenstaand citaat eveneens naar de grote universele denker Gottfried Wilhelm Leibniz (1646-1716). Leibniz’ bekende uitspraak in bovenstaand citaat (“blind chance of the Epicureans”) verwijst naar de Oud-Griekse filosoof Epicurus, die stelde dat spontane atoomzwenkingen indeterministisch zijn. Epicurus probeerde zo noodzakelijkheid in de natuur te omzeilen om ruimte

¹⁴. Laplace, *A Philosophical Essay on Probabilities*, 4.

¹⁵. Laplace, 3–4.

te maken voor het bestaan van menselijke vrijheid.¹⁶ Leibniz stelde echter dat de *chance* van Epicurus blind was, omdat de atoomzwenkingen waarvan sprake ‘onverschillig’ gebeuren, i.e. zonder reden. De poging van Epicurus om aan noodzakelijkheid te ontsnappen zou zo eindigen in doelloosheid in plaats van vrije wil.¹⁷

Leibniz wees dit soort doelloosheid af en ging ervan uit dat niets zonder reden gebeurt. Dit formuleerde hij met het principe van voldoende grond, waarmee Leibniz probeerde uit te drukken dat er voor alles wat gebeurt een voldoende reden moet zijn. Het principe van voldoende grond legt daarmee de nadruk op de redenen van gebeurtenissen in de wereld: niets gebeurt zomaar, er zijn steeds redenen (gronden) te vinden.¹⁸

Hoewel Laplace en Leibniz refereren naar hetzelfde principe, is er toch een belangrijk verschil te vinden. Leibniz gebruikt het woord ‘reden’ in een context van finale causatie ofwel doelgerichtheid. Laplace daarentegen heeft het over ‘reden’ op een productieve manier; over de oorzaak die een onmiddellijk effect produceert. In zekere zin vernauwt Laplace de opvatting van Leibniz door een conditie toe te voegen. De reden waarom dingen zo zijn en niet anders, is te vinden in het moment net voor de totstandkoming van het effect. Ofwel: de volgende toestand is het gevolg van de vorige.¹⁹

Wanneer Laplace spreekt over “the present state of the universe as the effect of its anterior state and as the cause of the one which is to follow”,²⁰ dan heeft hij het over deze ‘productieve causaliteit’. Stellen dat de volgende toestand zijn oorzaak heeft in de vorige, is echter niet hetzelfde als stellen dat de volgende toestand uniek bepaald is. Of anders: stellen dat elke gebeurtenis een oorzaak heeft impliceert niet dat dezelfde oorzaak steeds hetzelfde effect genereert, een belangrijke voorwaarde die nodig lijkt om van determinisme te kunnen spreken.²¹

16. Christoph H. Lüthy en Carla Rita Palmerino, “Conceptual and Historical Reflections on Chance (and Related Concepts)”, in *The Challenge of Chance: A Multidisciplinary Approach from Science and the Humanities*, geredigeerd door Klaas Landsman en Ellen van Wolde (Cham: Springer International Publishing, 2016), 21–22.

17. Lüthy en Palmerino, 34.

18. Marij van Strien, “On the Origins and Foundations of Laplacian Determinism”, *Studies in History and Philosophy of Science* 45 (2014): 27.

19. van Strien, 27.

20. Laplace, *A Philosophical Essay on Probabilities*, 4.

21. Earman, *A Primer on Determinism*, 6.

Laplace heeft het in zijn definitie echter ook over een alwetende intelligentie voor wie zowel toekomst als verleden bekend zijn. Het idee van de alwetende intelligentie is daarmee een uitdrukking van noodzakelijkheid en zekerheid. Hoewel Laplace niet aanneemt dat deze intelligentie *echt* bestaat, wordt er wel mee uitgedrukt dat een oorzaak zijn gevolg uniek vastlegt. De demon verkrijgt absolute zekerheid op basis van één enkele toestand, omdat alle vorige en volgende toestanden ervan afgeleid kunnen worden. Als meerdere toestanden het geval zouden kunnen zijn, zou er voor de demon van Laplace geen absolute zekerheid kunnen optreden. Integendeel, indien dezelfde beginvoorwaarden meerdere uitkomsten zouden kunnen genereren is er sprake van ongedetermineerdheid.

In Laplaces stelling is *in principe* voorspelbaarheid dus aanwezig, via het principe van voldoende grond en de zekerheid die de alwetende intelligentie over verleden, heden en toekomst bezit. Het principe van voldoende grond geeft aan dat de volgende toestand zijn oorzaak heeft in de vorige, het idee van de alwetende intelligentie voegt toe dat deze toestanden uniek bepaald en *in principe* kenbaar zijn.

De menselijke geest kan streven naar de intelligentie die Laplace zich voorstelt, maar zal er steeds oneindig ver verwijderd van blijven. Laplace verwoordt dit als volgt:

The human mind offers, in the perfection which it has been able to give to astronomy, a feeble idea of this intelligence. (...) All these efforts in the search for truth tend to lead it back continually to the vast intelligence which we have just mentioned, but from which it will always remain infinitely removed.²²

Laplace stelt dat de menselijke geest en kennis oneindig ver verwijderd zijn van de intelligentie die toekomst en verleden voor zich kan zien. Daarbij is de onwetendheid van de geest volgens Laplace groter bij aardse fenomenen in vergelijking met de successen van de astronomie. Het pad van een luchtmolecuul bijvoorbeeld beschrijft dezelfde regulariteit als die van een planetenbaan. Het enige verschil tussen beide is de mate van kennis over het fenomeen in kwestie.²³ Om dit onderscheid verder te begrijpen, is het nodig om Laplaces werk in de kansrekening van naderbij te bekijken.

²². Laplace, *A Philosophical Essay on Probabilities*, 4.

²³. Laplace, 6.

2.4 Zekerheid en waarschijnlijkheid

Hoewel exacte voorspellingen voor ons onmogelijk zijn, is het verkleinen van onze onzekerheid wel mogelijk. Een manier om dat te doen is het gebruik van natuurwetten. De natuurwetten maken de waarschijnlijkheid van het correct voorspellen van een gebeurtenis immers groter. Het kleiner maken van onze onzekerheid staat gelijk aan het vergroten van de kennis van de natuur. Absolute zekerheid, zoals terug te vinden in de figuur van de demon, staat gelijk aan een kans van 1 (of 0).²⁴

Het Laplaciaans determinisme kan daarom niet volledig begrepen worden zonder Laplaces werk in de kansrekening. De manier waarop Laplace waarschijnlijkheid benadert in zijn *Essai Philosophique sur les Probabilités* is immers tekenend voor zijn begrip van het menselijk kennen. Zo schrijft hij: "Probability is relative, in part to this ignorance, in part to our knowledge."²⁵ Volgens Laplace vertoont het menselijke kennen overeenkomsten met de theorie van waarschijnlijkheden, omdat menselijke limitaties het verkrijgen van absolute zekerheid in de weg staan.

2.4.1 De formule van Laplace

In zijn *Essai Philosophique sur les Probabilités* stelt Laplace:

The theory of chance consists in reducing all the events of the same kind to a certain number of cases equally possible, that is to say, to such as we may be equally undecided about in regard to their existence, and in determining the number of cases favorable to the event whose probability is sought. The ratio of this number to that of all the cases possible is the measure of this probability, which is thus simply a fraction whose numerator is the number of favorable cases and whose denominator is the number of all the cases possible.²⁶

Zolang de mogelijkheid tot optreden van alle uitkomsten even groot is, kan de waarschijnlijkheid van een bepaalde uitkomst worden uitgedrukt als een breuk met de gunstige uitkomsten in de teller en het totaal aantal mogelijke uitkomsten in de

²⁴. Een kans van 0 staat dan gelijk aan de zekerheid dat iets *niet* zal gebeuren.

²⁵. Laplace, *A Philosophical Essay on Probabilities*, 6.

²⁶. Laplace, 6–7.

noemer. De waarschijnlijkheid van een bepaalde gebeurtenis blijft dezelfde zolang er een evenredige toename is van het aantal gunstige en mogelijke uitkomsten.

Dit laatste illustreert Laplace aan de hand van een voorbeeld, waarbij twee urnes A en B worden beschouwd. Urne A is gevuld met vier witte en twee zwarte ballen, urne B met twee witte ballen en één zwarte bal. Wat is de kans om een zwarte bal te trekken uit urne A of B? Laplace stelde eerder dat deze waarschijnlijkheid uitgedrukt kan worden door het aantal gunstige uitkomsten te delen door alle mogelijke uitkomsten. Aangezien er in urne A twee gunstige uitkomsten zitten (zwarte ballen) op een totaal van zes ballen, is de gezochte waarschijnlijkheid $\frac{2}{6}$. Vereenvoudigd levert dat een kans van $\frac{1}{3}$. In urne B is de situatie verschillend, maar de kans identiek. Met één zwarte bal en twee witte is ook daar de kans op een zwarte bal $\frac{1}{3}$. Wat Laplace hiermee aantoont is dat urne B een vereenvoudigde versie is van urne A.

Laplace bewijst zo dat de kans gelijk blijft bij een evenredig aantal gewenste en mogelijke uitkomsten. Vandaag staat deze redenering bekend als de formule van Laplace²⁷,

$$P(A) = \frac{\text{aantal voor A gunstige uitkomsten}}{\text{aantal mogelijke uitkomsten}}, \quad (2.3)$$

waarbij $P(A)$ staat voor de kans dat (de gunstige) gebeurtenis A optreedt.

2.4.2 Kans als subjectieve aangelegenheid

Wat heeft de formule van Laplace te maken met het menselijk kennen? Laplace beschouwt kans als een subjectieve aangelegenheid. De waarschijnlijkheid op een gebeurtenis kan groter of kleiner worden, afhankelijk van de kennis van de waarnemer. Ter illustratie volgt opnieuw een voorbeeld van Laplace uit zijn *Essai Philosophique sur les Probabilités*.

Laplace vraagt ons om opnieuw urnes te beschouwen die gevuld zijn met ballen. Deze keer zijn er drie urnes A, B en C. Twee van deze urnes zijn gevuld met witte ballen, de andere met zwarte ballen. Wat is de kans op een zwarte bal als uit urne C een bal wordt getrokken? Omdat niet geweten is welke urne de zwarte ballen bevat, is de kans bij elke urne even groot. Er is een kans van $\frac{1}{3}$ om de ‘juiste’ urne, ofwel die met de zwarte ballen, te kiezen.

²⁷. Hoewel Laplace deze regel formuleerde, wordt deze in de hedendaagse kansrekening ook wel het theorema van Bayes genoemd, naar de Engelse wiskundige Thomas Bayes (1702-1761).

Stel dat bekend wordt dat urne A enkel witte ballen bevat, dan valt die urne af. In plaats van $\frac{1}{3}$ wordt de kans om de juiste urne te kiezen $\frac{1}{2}$. Indien uiteindelijk ook geweten is dat urne B witte ballen bevat, is het duidelijk dat de zwarte ballen zich in C bevinden. Nu wordt de kans op het trekken van een zwarte bal uit urne C gelijk aan 1. Merk op dat dit resultaat voortkomt uit het feit dat de drie urnes slechts één kleur bevatten. Bij het kiezen van de urne met zwarte ballen is de kans op het trekken van een zwarte bal gelijk aan 1.

Waarschijnlijkheid en zekerheid worden zo met elkaar verbonden. Een kans van 1 (of 0) duidt op de zekerheid dat een bepaald resultaat verkregen zal worden. Zekerheid voor de menselijke geest is volgens Laplace echter relatief aan de kennis van de waarnemer: "Upon this condition, certainty and probability are comparable, although there may be an essential difference between the two states of the mind when a truth is rigorously demonstrated to it, or when it still perceives a small source of error."²⁸ Volgens Laplace bevat kans dus een subjectief element. Er is een zekerheid die de waarnemer kan bereiken, maar dat kan alleen door het hebben van voldoende kennis.

Uiteraard zijn de urnes slechts voorbeelden, maar ze laten wel zien waarom waarschijnlijkheden nodig zijn in een volledig gedetermineerde wereld. Waarschijnlijkheden zijn nuttig om het onderscheid te duiden tussen menselijke kennis en de absolute zekerheid van Laplaces intelligentie. De absolute zekerheid van die laatste geeft aan dat enkel kansen van 1 (of 0) optreden. Met andere woorden: alles gebeurt met zekerheid voor de intelligentie van Laplace. Bij een menselijke waarnemer treden waarschijnlijkheden (anders dan 1 of 0) voortdurend op vanwege onze gebrekkige kennis.

2.5 Conclusie

In dit hoofdstuk werd stilgestaan bij de vraag in hoeverre het Laplaciaans determinisme voorspelbaarheid impliceert. Laplace drukt in zijn beroemde passage immers het idee uit van een hypothetische intelligentie die weet heeft van alle natuurwetten en de begincondities van alle materie in het universum. Op basis van die kennis zou de alwetende intelligentie zowel verleden als toekomst voor het geestesoog zien verschijnen.

²⁸. Laplace, *A Philosophical Essay on Probabilities*, 8.

Er werd besproken dat het determinisme van Laplace ontologisch is. In *Essai Philosophique sur les Probabilités* komt dat immers naar voren in het principe van voldoende grond. De alwetende intelligentie illustreert het contrast met een beperkt menselijk kennen. Zekerheid wordt gelijkgesteld aan een waarschijnlijkheid van 1 (of 0) dat een gebeurtenis optreedt. Laplace ging er dus *in principe* van uit dat alles in het universum volledig voorspelbaar zou zijn als men over volledige informatie beschikte. Aangezien zoiets praktisch onmogelijk is, richtte Laplace zich tot de kansrekening wat betreft het menselijk kennen.

Het Laplaciaans determinisme behelst een ideaal van wiskundige begrijpelijkheid, een overtuiging die versterkt werd door de waargenomen regulariteit van hemelfenomenen. Die leende zich uitstekend tot het vinden van wiskundige wetten die een unieke bepaaldheid in zich droegen. Daarmee is de *in principe* voorspelbaarheid van Laplace een weerspiegeling van het idee dat de natuur wiskundig begrepen kan worden.²⁹

²⁹. Amy Dahan Dalmedico, "Chaos, Disorder, and Mixing: A New Fin-de-Siècle Image of Science", *Growing explanations: Historical Perspectives on Recent Science*, 2004, 68.

Hoofdstuk 3

Determinisme à la Poincaré

Volgens Laplace was de natuur *in principe* voorspelbaar: ze laat zich in wiskundige wetten vatten die, gegeven perfecte kennis van de beginvoorwaarden, leiden tot perfecte voorspelling van verleden en toekomst.¹ Typisch wordt dan ook gezegd dat de klassieke natuurkunde deterministisch is. De term ‘klassiek’ verwijst naar de natuurkunde van vóór de komst van de kwantummechanica en de relativiteitstheorie, die rond 1930 hun intrede maakten.² Het determinisme van de klassieke natuurkunde wordt dan gelijkgesteld aan het Laplaciaanse beeld.

Het is echter zo dat het Laplaciaans determinisme al eerder onder druk stond, nog vóór de grote natuurkundige revoluties van de 20^e eeuw plaatsvonden. Dat is goed te zien in het werk van Henri Poincaré (1854-1912). Poincaré verdedigt een andere vorm van determinisme, waarbij determinisme beschouwd wordt als een aanname die nodig is om aan wetenschap te kunnen doen.³ Volgens Poincaré zijn natuurwetten geen exacte uitdrukkingen van hoe de natuur werkt, maar benaderingen van de werkelijkheid. Aangezien we er niet vanuit kunnen gaan dat natuurwetten exact geldig zijn, lijkt het idee van *in principe* voorspelbaarheid moeilijk te handhaven. Verder wijst Poincaré op de onvoorspelbaarheid van fenomenen: hij laat zien dat er gevoelige afhankelijkheid van begincondities kan optreden. Desondanks was Poincaré geen indeterminist.

In de volgende secties wordt duidelijk gemaakt op welke manier Poincarés determinisme afwijkt van dat van Laplace. In Sectie 3.1 wordt beschreven waarom

1. De term ‘voorspelling’ kan ook voor het verleden worden gebruikt, zoals eerder werd opgemerkt in Sectie 2.1.

2. Marij van Strien, “Was Physics Ever Deterministic? The Historical Basis of Determinism and the Image of Classical Physics”, *The European Physical Journal H* 46, no. 8 (2021): 1.

3. van Strien, 16.

de gevoelige afhankelijkheid van begincondities correcte voorspellingen volgens Poincaré onmogelijk maken. Ter illustratie wordt stilgestaan bij een voorbeeld: de vraag omtrent de stabiliteit van het zonnestelsel (Sectie 3.1.1). Uit dit voorbeeld wordt duidelijk dat Poincaré een onderscheid maakte tussen wiskundige problemen enerzijds en de fysieke implicaties van natuurwetten anderzijds. Dat komt deels door het onvoldoende kennen van de begincondities bij systemen die daar gevoelig aan zijn, maar ook door het feit dat natuurwetten volgens Poincaré benaderend toegepast worden. Dat natuurwetten benaderingen zijn van de werkelijkheid, wordt verder besproken in Sectie 3.2, omdat het Poincarés kijk op determinisme in de wetenschap illustreert. Volgens Poincaré is determinisme niet ontologisch, maar wordt het *a priori* en *a posteriori* aangenomen binnen de wetenschap.

3.1 Gevoelige afhankelijkheid van begincondities

In het boek *Science et Méthode* (1908) verwoordt Henri Poincaré de invloed van het Laplaciaans gedachtegoed als volgt:

We have become absolute determinists (...). Every phenomenon, however minute, has a cause; and a mind infinitely powerful, infinitely well-informed about the laws of nature, could have foreseen it from the beginning of the centuries.⁴

Hoewel Poincaré niet expliciet naar Laplace verwijst, lijkt bovenstaand citaat een herhaling van Laplaces stelling. Poincaré beschrijft het beeld van een intelligente geest die zekerheid heeft over verleden en toekomst, wat een absoluut determinisme uitdrukt. In hetzelfde werk vervolgt Poincaré:

If we could know exactly the laws of nature and the situation of the universe at the initial instant, we should be able to predict exactly the situation of this same universe at a subsequent instant.⁵

Opnieuw vertrekt Poincaré van het Laplaciaans determinisme door de nadruk te leggen op de link tussen exacte kennis en exacte voorspellingen. Vervolgens wijst hij op een praktische onmogelijkheid:

⁴. Henri Poincaré, *The Foundations of Science: Science and Hypothesis, The Value of Science, Science and Method*, vertaald door George Bruce Halsted (The Science Press, 1913), 395.

⁵. Poincaré, 397–398.

But even when the natural laws should have no further secret for us, we could know the initial situation only approximately. If that permits us to foresee the subsequent situation with the same degree of approximation, this is all we require, we say the phenomenon has been predicted, that it is ruled by laws. But this is not always the case; it may happen that slight differences in the initial conditions produce very great differences in the final phenomena; a slight error in the former would make an enormous error in the latter. Prediction becomes impossible (...).⁶

Bij systemen die een gevoelige afhankelijkheid vertonen van de begincondities voor hun verdere evolutie wordt voorspelling onmogelijk, omdat de begincondities niet exact gekend kunnen zijn. Aangezien de beginsituatie enkel bij benadering geweten is, wordt het voorspellen van sommige systemen onmogelijk - zelfs met perfecte kennis van de natuurwetten.

Een goed voorbeeld hiervan zijn weerfenomenen, die tot stand komen in de turbulente omgeving van de atmosfeer. Het onstabiele evenwicht van de atmosfeer maakt bijvoorbeeld mogelijk dat kleine temperatuursverschillen aanleiding geven tot wervelstormen met enorme windsnelheden. Het is echter onmogelijk om te voorspellen waar deze wervelstormen zullen plaatsvinden, omdat de condities onvoldoende gekend zijn. Poincaré schrijft:

We see that great perturbations generally happen in regions where the atmosphere is in unstable equilibrium. The meteorologists are aware that this equilibrium is unstable, that a cyclone is arising somewhere; but where they can not tell; one tenth of a degree more or less at any point, and the cyclone bursts here and not there, and spreads its ravages over countries it would have spared. This we could have foreseen if we had known that tenth of a degree, but the observations were neither sufficiently close nor sufficiently precise (...).⁷

Het onstabiele evenwicht in de atmosfeer zorgt ervoor dat het systeem bij de minste verstoring weg van het evenwichtspunt beweegt. Net zoals een voorwerp dat op zijn massamiddelpunt balanceert, is de kleinste afwijking voldoende om het evenwicht te verstoren. Voorspelling wordt hierdoor onmogelijk.

⁶ Poincaré, *The Foundations of Science: Science and Hypothesis, The Value of Science, Science and Method*, 397–398.

⁷ Poincaré, 398.

Poincaré was niet de eerste die wees op de gevoelige afhankelijkheid van begincondities. Eerder werd dit gedrag door natuurkundige James C. Maxwell (1831-1879) opgemerkt. Maxwell onderscheidde in *Matter and Motion* (1888) “the same causes will always produce the same effects”⁸ van “like causes produce like effects”.⁹ Maxwell vroeg zich af of het zinvol is om het te hebben over *exact* dezelfde oorzaken, aangezien het moeilijk is om te onderscheiden of toestanden ooit *exact* hetzelfde zijn. In de plaats lijkt het beter om het te hebben over situaties die min of meer gelijk zijn, en die vervolgens ongeveer dezelfde effecten veroorzaken. Maxwell wijst er echter op dat deze uitspraak enkel geldt voor systemen waarin kleine variaties in de begincondities leiden tot kleine variaties in de finale toestand van een systeem. Systemen die hieraan voldoen zijn stabiel, in die zin dat een groter aantal verschillende begincondities zal leiden tot hetzelfde gedrag en dus correcte voorspelling. Deze uitspraak kan echter falen bij systemen die instabiel zijn of gevoeligheid van begincondities vertonen. Inderdaad, indien kleine initiële veranderingen grote veranderingen veroorzaken in de finale staat, dan gaat de tweede uitspraak niet langer op. Het gevolg van deze instabiliteit is dat voorspelling moeilijk tot onmogelijk wordt.¹⁰ Het is zeer waarschijnlijk dat Poincaré bekend was met Maxwells werk en hier inspiratie uit geput heeft.¹¹

Poincaré beschreef de effecten van instabiliteiten niet enkel op middelgrote schaal in de atmosfeer, maar ook op de grotere schaal van het universum. Hij boog zich namelijk over het eeuwenoude probleem omtrent de stabiliteit van het zonnestelsel en stelde vast dat de gevoelige afhankelijkheid van begincondities ook daar een belangrijke rol speelde.

3.1.1 De stabiliteit van het zonnestelsel

Het stabiliteitsprobleem van het zonnestelsel draait om de vraag of de hemellichamen hun huidige (regelmatige) banen zullen voortzetten, of gaandeweg sterke baanswijzigingen zullen vertonen. In dat laatste geval zijn botsingen tussen hemellichamen bijvoorbeeld mogelijk, of kan het zijn dat bepaalde planeten zich

8. James C. Maxwell, *Matter and Motion* (Cambridge: Cambridge University Press, 1888), 20.

9. Maxwell, 21.

10. Atmanspacher, “Determinism is Ontic, Determinability is Epistemic”, 62.

11. Matthew W. Parker, “Did Poincaré Really Discover Chaos?”, *Studies in the History and Philosophy of Modern Physics* 29, no. 4 (1998): 586.

zullen verwijderen uit het zonnestelsel.¹²

Zoals gezien in Hoofdstuk 2, was Laplace eerder bezig geweest met het begrijpen van de beweging van hemellichamen in zijn *Traité de Mécanique Céleste*. Op basis van de wetten van Newton had Laplace kunnen bevestigen dat de beweging van de planeten verklaard kon worden en in overeenstemming was met observatie. Laplace had eveneens berekeningen uitgevoerd die aantoonde dat het zonnestelsel stabiel was. Om zijn wiskundige vergelijkingen op te lossen, maakte Laplace gebruik van benaderingsmethoden. Het is namelijk zo dat het oplossen van een n-deeltjesprobleem, ofwel het bepalen van de beweging van een aantal deeltjes die elkaar aantrekken via de zwaartekracht, een extreem gecompliceerd wiskundig probleem is.¹³

Een exacte analytische oplossing is mogelijk voor twee massa's. Reeds vanaf drie deeltjes wordt dit probleem een stuk complexer en analytisch onoplosbaar.¹⁴ In *Les Méthodes Nouvelles de la Mécanique Céleste*¹⁵ (1899) probeert Poincaré inzicht te krijgen in het driedeeltjesprobleem. Hij maakt daarbij gebruik van een geometrische denkwijze in plaats van een analytische benadering en stelt vast dat de oplossing niet stabiel is.¹⁶ Hij stelt over het geometrische resultaat: "One is struck by the complexity of this figure that I am not even attempting to draw. Nothing can give us a better idea of the complexity of the three-body problem (...)"¹⁷

Naast het feit dat het probleem niet exact analytisch onoplosbaar is, is er de verdere beperking dat de begincondities van de deeltjes niet exact gekend kunnen zijn. Wanneer er gevoelige afhankelijkheid van begincondities optreedt, is er een merkbaar onderscheid tussen de voorspelling (wat als het ware 'uit de wiskunde' volgt) en de daadwerkelijke observatie. Bij het driedeeltjesprobleem, of algemener

¹². Florin Diacu en Philip Holmes, *Celestial Encounters: The Origins of Chaos and Stability* (New Jersey: Princeton University Press, 1996), 129.

¹³. Laskar, "La Stabilité du Système Solaire", 183–184.

¹⁴. Het probleem is niet-integreerbaar, wat wil zeggen dat er geen gesloten oplossing bestaat. Dat komt omdat er onvoldoende behoudswetten zijn om het probleem te reduceren naar een kleiner aantal vrijheidsgraden (zie ook Jean-Luc Chabert en Amy Dahan Dalmedico, "Les Idées Nouvelles de Poincaré", in *Chaos et déterminisme*, geredigeerd door A. Dahan Dalmedico, J.-L. Chabert en K. Chemla (Parijs: Éditions du Seuil, 1992), 288–289).

¹⁵. Henri Poincaré, *Les Méthodes Nouvelles de la Mécanique Céleste*, vol. 3 (Parijs: Gauthier-Villars et Fils, 1899).

¹⁶. Het geometrische resultaat wordt gekenmerkt door onstabiele periodische oplossingen. Deze noemde Poincaré homoklinisch en heteroklinisch, termen die ook vandaag nog steeds gebruikt worden bij de analyse van dynamische systemen. Voor een eenvoudige introductie tot de geometrische analyse van dynamische systemen zie Hoofdstuk 6 in Steven H. Strogatz, *Nonlinear Dynamics and Chaos: With Applications to Physics, Biology, Chemistry, and Engineering* (Boca Raton: CRC Press, 2018).

¹⁷. Poincaré, *Les Méthodes Nouvelles de la Mécanique Céleste*, 389.

het n-deeltjesprobleem, speelt dit aspect inderdaad: het wordt gekenmerkt door een gevoelige afhankelijkheid van de begincondities.

Zelfs indien er een exacte analytische oplossing voorhanden zou zijn voor drie of meer deeltjes, is het niet duidelijk of het zonnestelsel stabiel is. Daardoor is de stabiliteit van het zonnestelsel vooral een wiskundig probleem, in plaats van een natuurkundig probleem. De oplossing die zou volgen uit de wiskundige vergelijkingen is gebaseerd op een precieze beginconditie die steeds zal afwijken van de werkelijke waarde. Een fysische meting kan immers nooit een exacte beginconditie opleveren. Dat is overbrugbaar indien systemen continu afhangen van de beginvoorwaarden en kleine veranderingen in de beginvoorwaarden leiden tot kleine veranderingen in het gedrag van het systeem. In het geval van een gevoelige afhankelijkheid van begincondities is de afwijking van de werkelijke waarde met de wiskundige beginconditie problematisch. Indien begincondities slechts tot op zekere hoogte gekend kunnen zijn, en indien oplossingen extreem afhangen van die begincondities, is het duidelijk waarom de werkelijkheid afwijkt van de wiskundige evolutie.¹⁸

De Franse wiskundige Jacques Hadamard (1865-1963), een tijdgenoot van Poincaré, werd geïnspireerd door Poincarés werk omtrent het driedeeltjesprobleem en kwam met de term *well-posedness*. *Well-posed* problemen, oftewel goed gestelde problemen, hebben unieke oplossingen die zich continu verhouden tot de begincondities. In tegenstelling tot de stabiliteit van het zonnestelsel, dat, aldus Hadamard behoort tot de categorie van *ill-posed* problemen (slecht gestelde problemen). Aangezien het in realiteit slechts mogelijk is om begincondities met eindige precisie te kennen vanwege praktische limitaties, is de fysieke geldigheid van oplossingen die discontinu afhangen van de beginvoorwaarden beperkt.¹⁹

De fysieke implicaties van (wiskundige) natuurwetten zijn door de gevoelige afhankelijkheid van begincondities dus onduidelijk. Hoewel een wet deterministisch kan zijn in wiskundige zin (dezelfde beginvoorwaarden geven dezelfde wiskundige evolutie), wordt er een onderscheid waarneembaar tussen de werkelijkheid en de wiskunde. In Poincarés werk is deze afstand expliciet zichtbaar.

¹⁸ Dahan Dalmedico, "Le Déterminisme de Pierre-Simon Laplace et le Déterminisme Aujourd'hui", 400-401.

¹⁹ June Barrow-Green, *Poincaré and the Three Body Problem* (Providence: American Mathematical Society, 1997), 260.

Hij beschouwde twee verschillende aspecten: enerzijds de onmogelijkheid om daadwerkelijk de beweging van de planeten te voorspellen, anderzijds de puur theoretische aangelegenheid die bestaat uit het ontwikkelen van methoden en concepten om dynamische systemen te begrijpen.²⁰

Poincaré gaf zelf aan dat de fysieke implicaties van zijn resultaat beperkt waren. Naast het onvoldoende precies kennen van de begincondities, is er nog een bijkomende limitatie. Er worden namelijk voortdurend benaderingen gemaakt bij de toepassing van natuurwetten. Hemellichamen zijn geen puntmassa's en mogelijk zijn er, naast de zwaartekracht tussen de beschouwde deeltjes, ook andere krachten aan het werk.²¹ In *Sur le Problème des Trois Corps et les Équations de la Dynamique*²² (1890) beschouwt Poincaré bijvoorbeeld het zogenaamde planaire en 'restricted' (of beperkte) drielichamenprobleem, waarin drie massa's zich in hetzelfde vlak bevinden en één massa verwaarloosbaar klein is in vergelijking met de andere twee.²³ Dit is nodig om het probleem wiskundig oplosbaar te maken, maar daarmee wordt de fysieke of natuurkundige situatie benaderd.

Het idee dat bij het toepassen van natuurwetten steeds benaderingen gemaakt worden van de werkelijkheid, kenmerkt Poincarés kijk op determinisme. Voor Poincaré zijn natuurwetten, contra Laplace, geen absoluut en universeel geldige uitdrukkingen van hoe de natuur werkt. Hierdoor komt de *in principe* voorspelbaarheid van Laplace onder druk te staan.

3.2 Natuurwetten als benaderingen in de wetenschap

In het Laplaciaans determinisme wordt, zoals gezien in het vorige hoofdstuk, een *in principe* voorspelbaarheid geïmpliceerd. Hoewel Laplace wel degelijk duidt op menselijke beperkingen, lijkt er geen limiet tot kennis. Het beeld dat de wereld in essentie kenbaar is, wordt geïllustreerd door de alwetende intelligentie van Laplace. Verder duidt het principe van voldoende grond bij Laplace op een duidelijk ontologisch determinisme.

²⁰. Dahan Dalmedico, "Le Déterminisme de Pierre-Simon Laplace et le Déterminisme Aujourd'hui", 288.

²¹. van Strien, "Was Physics Ever Deterministic? The Historical Basis of Determinism and the Image of Classical Physics", 12–13.

²². Henri Poincaré, "Sur le Problème des Trois Corps et les Équations de la Dynamique", *Acta Mathematica* 13 (1890): 1–270.

²³. Barrow-Green, *Poincaré and the Three Body Problem*, 13–14.

Bij Poincaré is er geen sprake van een ontologisch determinisme. Hij zag een theorie, contra Laplace, niet als een exacte weergave van de werkelijkheid. Natuurwetten zijn volgens Poincaré steeds benaderingen van de werkelijkheid. In plaats van het ontologische geloof dat de natuur *in principe* begrijpelijk is, is bij Poincaré sprake van een duidelijke kennisgrens. Hoewel steeds nauwkeurigere voorspellingen met steeds betere natuurwetten volgens Poincaré mogelijk zijn, kan er niet vanuit gegaan worden dat er exacte natuurwetten bestaan die de natuur exact beschrijven.

Aan de hand van verschillende gradaties van onwetendheid wordt duidelijker op welke manier Poincaré van Laplace afwijkt. Zekerheid linkt Poincaré, net zoals Laplace (zie Hoofdstuk 2), aan waarschijnlijkheid. Deze waarschijnlijkheid is een maat voor de hoeveelheid onwetendheid die er in het spel is. Absolute zekerheid komt volgens Poincaré overeen met de alwetendheid in Laplaces determinisme: "If we were not ignorant, there would be no probability, there would be room for nothing but certainty."²⁴ Het tegenovergestelde is totale onwetendheid. Zonder kennis van begincondities en natuurwetten is het onmogelijk om ook maar iets te zeggen over de waarschijnlijkheid van het fenomeen in kwestie.²⁵

Poincaré onderscheidt vervolgens twee verschillende vormen van onwetendheid: een vorm die onoverkomelijk is en een vorm die overkomen kan worden. De onoverkomelijke vorm van onwetendheid komt voort uit het kennen van de wet van een systeem, maar niet van de exacte begincondities. In de kinetische gastheorie bijvoorbeeld kunnen huidige snelheden van moleculen niet bepaald worden. In de plaats wordt gesteund op een statistische benadering om gemiddelde grootheden (bijvoorbeeld druk en temperatuur) te formuleren. Poincaré: "The calculus of probabilities only enables us to predict the mean phenomena which will result from the combination of these velocities."²⁶ Er ontbreekt informatie (de exacte begincondities) om zekerheid te verkrijgen over het gedrag van de moleculen.

Indien de begincondities gekend zouden zijn, dan was het wel mogelijk geweest om zekerheid te verkrijgen. Inderdaad, de overkomelijke gradatie van onwetendheid houdt volgens Poincaré verband met het uitvoeren van een berekening. Stel dat de begintoestand van een systeem exact geweten is en eveneens de wet die het

²⁴. Poincaré, *The Foundations of Science: Science and Hypothesis, The Value of Science, Science and Method*, 159.

²⁵. Poincaré, 160.

²⁶. Poincaré, 160.

systeem beschrijft, dan staat enkel een berekening in de weg tussen niet-weten en weten. Bij deze gradatie is er enkel sprake van probabiliteit vóór het uitvoeren van de berekening. Alle gegevens zijn gekend om van waarschijnlijkheid naar zekerheid te gaan.²⁷

Hoewel 'zekerheid' verkregen kan worden in dit tweede geval, is er een cruciaal verschil te vinden met Laplace. De zekerheid waarvan sprake is geen absolute zekerheid. Poincaré acht het immers onmogelijk om natuurwetten exact of daadwerkelijk te kennen. Het Laplaciaans determinisme kan daarom beschouwd worden als een "naïef" beeld van wetenschap.²⁸ De *in principe* voorspelbaarheid van Laplace wijst op een onderliggend geloof dat natuurwetten gevonden kunnen worden die correcte uitdrukkingen zijn van hoe de natuur werkt. Dat deze exacte wetten ontdekt kunnen worden, is onderdeel van het geloof dat de 'ware' toedracht over hoe de natuur werkt achterhaald kan worden. Het determinisme van Laplace is dus, zoals eerder in Hoofdstuk 2 besproken, ontologisch van aard.

Het is volgens Poincaré niet mogelijk om exacte natuurwetten te formuleren. Wetten kunnen echter wel steeds vervangen worden door nieuwe wetten die de werkelijkheid beter benaderen. De wetenschapper moet volgens Poincaré aannemen dat dit een nuttig streven is, i.e. dat betere voorspellingen mogelijk zijn met betere theorieën. Indien een voorspelling faalt, wijst dat op de mogelijkheid van het vinden van een wet die beter in overeenstemming is met de werking van de natuur.²⁹

Het falen van voorspellingen wil niet zeggen dat determinisme in vraag gesteld moet worden, maar dat de theorie die gebruikt werd om de voorspelling te doen herzien dient te worden. Poincaré verwoordt deze aanname zelf als volgt:

"For all these reasons, no particular law will ever be more than approximate and probable. Scientists have never failed to recognize this truth; only they believe, right or wrong, that every law may be replaced by another closer and more probable, that this new law will itself be only provisional, but that the same movement can continue indefinitely, so

²⁷. Poincaré, *The Foundations of Science: Science and Hypothesis, The Value of Science, Science and Method*, 159.

²⁸. Jacintho Del Vecchio Junior, "Chance and Probability in Poincaré's Epistemology", *Philosophia Scientiæ* 20, no. 2 (2016): 179.

²⁹. van Strien, "Was Physics Ever Deterministic? The Historical Basis of Determinism and the Image of Classical Physics", 16.

that science in progressing will possess laws more and more probable, that the approximation will end by differing as little as you choose from exactitude and the probability from certitude.”³⁰

Voor Poincaré was determinisme een zinvol concept binnen de wetenschap, omdat het wetenschappers ertoe drijft om verder te blijven zoeken. Hij neemt daarbij afstand van het Laplaceaans determinisme, waarbij de wereld op zichzelf kenbaar zou kunnen zijn. Tussen het op conventies en hypothesen gestoelde raamwerk van de wetenschap en de wereld zelf zit volgens Poincaré een afstand; natuurwetten beschrijven niet de wereld zelf.

Wetenschap is volgens Poincaré *a priori* en *a posteriori* deterministisch. Zo schrijft hij in het postuum uitgegeven werk *Dernières Pensées* (1917):

Science is deterministic; it is deterministic a priori; it postulates determinism, because without it, science could not exist. It is also deterministic a posteriori; if it started out by postulating determinism, as an indispensable condition for its existence, it then demonstrates determinism precisely by existing, and each of its conquests is a victory for determinism.³¹

Wetenschap kan niet zonder de aanname dat de natuur regelmatigheden vertoont die in natuurwetten vervat kunnen worden. Dat geloof maakt wetenschap *a priori* deterministisch: ze gaat ervan uit dat determinisme bestaat. Tegelijk is ze ook *a posteriori* deterministisch, omdat voorspelbaarheid - of de toetsing van theorieën - een leidraad is bij de ontwikkeling van wetenschappelijke theorieën. De wetenschap demonstreert in die zin dat determinisme bestaat, omdat elke succesvolle voorspelling een bevestiging is van determinisme.

3.3 Conclusie

In het werk van Poincaré wordt de onvoorspelbaarheid van fenomenen beschreven door de gevoelige afhankelijkheid van begincondities. Toch verdedigt Poincaré geen indeterminisme, maar stelt hij dat determinisme als een aanname binnen de wetenschap gezien moet worden. Determinisme bij Poincaré betekent dan dat

³⁰. Poincaré, *The Foundations of Science: Science and Hypothesis, The Value of Science, Science and Method*, 341.

³¹. Henri Poincaré, *Dernières Pensées* (Parijs: Flammarion, 1917), 244.

steeds nauwkeurigere voorspellingen mogelijk zouden moeten zijn door middel van (steeds betere) natuurwetten.

Het determinisme van Poincaré wijkt daarmee af van dat van Laplace. Bij Poincaré lijkt er weinig ruimte voor *in principe* voorspelbaarheid; er is geen ware werkelijkheid die beschreven kan worden. Theorieën zijn benaderingen die vervangen kunnen worden door betere benaderingen. Voorspelbaarheid is een leidraad voor de toetsing van theorieën, maar het is geen strikte voorwaarde voor determinisme. Als voorspellingen falen, betekent dat niet dat determinisme ongeldig is. Eerder betekent onvoorspelbaarheid dat een theorie herzien moet worden, of dat begincondities onvoldoende gekend zijn bij systemen die daar gevoelig aan zijn. Correcte voorspellingen kunnen determinisme dus wel bevestigen, maar incorrecte voorspellingen kunnen determinisme niet ontkrachten. Poincaré maakte zo ruimte voor het idee dat voorspelbaarheid niet uit determinisme hoeft te volgen.

Hoofdstuk 4

Popper en praktische (on)voorspelbaarheid

Als determinisme betekent dat de wereld *in principe* voorspelbaar is, wat betekent het dan in de praktijk? Is het Laplaciaans determinisme überhaupt testbaar, en zo ja, voor wie? Karl Popper (1902-1994), één van de meest invloedrijke wetenschapsfilosofen van de 20^e eeuw, probeerde een testbare vorm van het Laplaciaans determinisme te introduceren door de nadruk te leggen op praktische voorspelbaarheid. In Poppers ‘wetenschappelijk’¹ determinisme wordt de alwetende intelligentie van Laplace vervangen door een superieure wetenschapper.

Het algemene idee achter Poppers ‘wetenschappelijk’ determinisme wordt in Sectie 4.1 uitgelegd, waarbij de motivatie voor een testbaar determinisme naar voren komt (Sectie 4.1.1). Popper wil het Laplaciaans determinisme weerleggen omdat hij wil ontsnappen aan het idee van een deterministisch universum. In Sectie 4.1.2 wordt echter duidelijk dat er grote verschillen optreden tussen het ‘wetenschappelijk’ determinisme en Laplaces stelling. Het feit dat Popper het ‘wetenschappelijk’ determinisme weerlegt op basis van een voorbeeld waarin onvoorspelbaarheid onvermijdelijk is (Sectie 4.1.3), lijkt daarom geen bedreiging van het Laplaciaans determinisme. In Sectie 4.2 wordt tenslotte uitgelegd dat Popper ontologie en epistemologie door elkaar haalt. Het ‘wetenschappelijk’ determinisme lijkt daarom niet tot indeterminisme te leiden, maar tot het verliezen van het oorspronkelijke idee van determinisme zoals Laplace dat voor ogen had.

1. Popper gebruikte ook aanhalingstekens in de originele Engelse term: ‘*scientific*’ *determinism*.

4.1 Poppers ‘wetenschappelijk’ determinisme

Het doel van Popper was niet om het Laplaciaans determinisme te onderschrijven, maar om aan te tonen dat het op Laplace gebaseerde ‘wetenschappelijk’ determinisme onhoudbaar is. Popper beschouwde indeterminisme immers als essentieel voor het bestaan van menselijke vrijheid.² Zonder verder uit te weiden over Poppers drijfveren om indeterminisme te verdedigen, biedt zijn werk een interessant perspectief omdat hij determinisme definieert via de notie van praktische voorspelbaarheid.

4.1.1 Metafysisch, religieus en ‘wetenschappelijk’ determinisme

Popper definieert allereerst enkele vormen van determinisme. In *The Open Universe: An Argument for Indeterminism* (1982) zet Popper het ‘wetenschappelijk’ determinisme af tegen het metafysisch determinisme. In metafysisch determinisme zijn gebeurtenissen op voorhand gedetermineerd, maar is er geen manier om dat te testen. Popper schrijft: “The metaphysical doctrine of determinism simply asserts that all events in this world are fixed, or unalterable, or predetermined. It does not assert that they are known to anybody, or predictable by scientific means. (...) Metaphysical determinism is clearly not testable.”³ Popper contesteert het metafysisch determinisme omwille van dit gebrek aan empirische verifieerbaarheid. Daarop formuleert hij zijn eigen versie van het Laplaciaans determinisme, het ‘wetenschappelijk’ determinisme, om het empirisch meetbaar te maken.

Naast het metafysisch determinisme onderscheidt Popper ook het religieus determinisme, dat van het metafysisch determinisme verschilt door het optreden van een goddelijk figuur die kennis heeft over de wereld. Het religieus determinisme vertrekt van het idee dat er een goddelijke alwetendheid bestaat die exact weet hoe de toekomst eruit ziet. Popper vergelijkt dit met een speelfilm: het stuk van de film dat zich reeds afgespeeld heeft is het verleden, het huidige beeld is het heden en de komende scènes zijn de toekomst. In zekere zin valt het verleden samen met de toekomst, omdat alle scènes reeds op voorhand vastgelegd (gedetermineerd) zijn door de goddelijke maker van de film.⁴

2. Peter Clark, “Popper on Determinism”, *Royal Institute of Philosophy Supplements* 39 (1995): 149.

3. Karl R. Popper, *The Open Universe: An Argument for Indeterminism* (Londen: Hutchinson Publishing Group, 1982), 7–8.

4. Popper, 5.

Het religieus determinisme heeft volgens Popper door de geschiedenis heen plaatsgemaakt voor het 'wetenschappelijk' determinisme: "Historically, one can look upon the idea of a 'scientific' determinism as the result of replacing the idea of God by the idea of nature, and the idea of divine law by that of natural law."⁵ In tegenstelling tot God, die ondoorgrondelijk is, kunnen de natuurwetten ontdekt worden door de mens. Voor Popper is de kern van het 'wetenschappelijk' determinisme het idee dat elke toekomstige gebeurtenis voorspeld kan worden op basis van de natuurwetten en de huidige toestand van de wereld.

Popper neemt daarom aan dat de voorspeller van Laplace een 'perfecte wetenschapper' is. De stelling van Laplace, aldus Popper, "makes the doctrine of determinism a truth of science rather than of religion".⁶ Volgens Popper zou de voorspeller van Laplace niet over bovenmenselijke intelligentie beschikken, maar over perfecte wetenschappelijke kwaliteiten. Hij stelt: "Laplace's demon is supposed to work, like a human scientist, with initial conditions and with 'theories', i.e., systems of natural laws."⁷

De verschuiving van metafysisch of religieus determinisme naar een wetenschappelijke variant is voor Popper belangrijk. Vanuit een metafysisch of religieus denkbeeld zijn gebeurtenissen gepredetermineerd. Aangezien dat niet testbaar is, zijn deze vormen onweerlegbaar vanuit een wetenschappelijk oogpunt. Het 'wetenschappelijk' determinisme bevat deze empirische testbaarheid wel. Via de notie van praktische voorspelbaarheid wordt determinisme een begrip dat getoetst kan worden aan de werkelijkheid.⁸

Popper poogt om het idee van Laplace (empirisch) rijker te maken, om het vervolgens steviger te kunnen bekritisieren.⁹ Aldus definieert Popper het 'wetenschappelijk' determinisme als volgt:

(...) I call 'scientific' determinism (...) the doctrine that the structure of the world is such that any event can be rationally predicted, with any desired

5. Popper, *The Open Universe: An Argument for Indeterminism*, 5.

6. Popper, 30.

7. Popper, 31.

8. Joseph Agassi, "Versions of Determinism", *Metascience: Scientific General Discourse* 2 (2022): 253–254.

9. Agassi, 253–254.

degree of precision, if we are given a sufficiently precise description of past events, together with all the laws of nature.¹⁰

4.1.2 Het Laplaciaans versus het ‘wetenschappelijk’ determinisme

Volgens Popper zou Laplace het ‘wetenschappelijk’ determinisme onderschrijven, omdat het sterke overeenkomsten vertoont met het Laplaciaans determinisme.¹¹ Hoewel het Laplaciaanse idee van voorspelling op basis van eerdere toestanden en natuurwetten aanwezig is, introduceert Popper in het ‘wetenschappelijk’ determinisme belangrijke verschillen.

Popper gaat er namelijk van uit dat het beeld van Laplace wordt ondersteund door twee eisen. De eerste is dat de voorspeller beschikt over beginvoorwaarden die gegeven zijn met eindige precisie. De tweede eis is dat het verzamelen, berekenen en meedelen van de voorspelling zich *binnen* het systeem, dus in de fysieke wereld, afspeelt.¹² Beide eisen veronderstellen samen dat de voorspeller een fysiek wezen is dat de beginvoorwaarden slechts met eindige precisie kent. Zoals nu besproken zal worden, wijken Poppers eisen in het ‘wetenschappelijk’ determinisme sterk af van het Laplaciaans determinisme.

De eerste eis wordt volgens Popper ondersteund door Laplaces opvatting dat beginvoorwaarden *in principe* exact gekend kunnen zijn. Het is namelijk onmogelijk voor de menselijke geest om begincondities daadwerkelijk *exact* te kennen. Er kan echter wel gestreefd worden naar verbetering, omdat er wel degelijk iets bestaat als ‘een volledige beginvoorwaarde’. Het al dan niet kennen van die exacte toestand is onbelangrijk, waar het om gaat is dat de mate van precisie steeds verbeterd kan worden op weg naar een volledige bepaling die *in principe* bestaat. Niet de huidige staat van kennis, maar precies de mogelijkheid tot het bereiken van meer kennis, lijkt Laplace daar volgens Popper van te overtuigen.¹³

Popper lijkt Laplace te volgen wat betreft de mogelijkheid tot *in principe* exact kennen. Er treedt echter een belangrijk verschil op met het Laplaciaans determinisme: de voorspeller bij Popper is geen alwetendheid, maar een rationeel wezen dat beginvoorwaarden slechts met eindige precisie kent. Dit in tegenstelling

10. Popper, *The Open Universe: An Argument for Indeterminism*, 1.

11. Popper, 34.

12. Popper, 34–35.

13. Popper, 30.

tot Laplaces alwetende intelligentie, die beginvoorwaarden kent met absolute precisie.

Popper verbindt voorspelbaarheid aan determinisme op basis van de kennis van een voorspeller die zich *binnen* het systeem bevindt, zoals tot uiting komt in de tweede eis. Volgens Popper moet het verzamelen, berekenen en meedelen van de voorspelling zich in de fysieke wereld afspelen. Met andere woorden: de voorspeller is geen “disembodied spirit”¹⁴ zoals bij Laplace, maar deel van de fysieke wereld. Popper zet deze stap om het eerder besproken metafysisch determinisme te vermijden. In plaats van een “vague idea of possible foreknowledge”¹⁵ wordt voorspelbaarheid een kwestie van rationaliteit en wetenschappelijke procedures. De voorspeller van Popper is daarom geen alwetende intelligentie die beginvoorwaarden exact kent, maar een “super-scientist”¹⁶ die beschikt over eindige precisie.

Aldus maakt Popper een drastische stap van voorspelbaarheid *in principe* naar een voorspelling in de praktijk. Popper wil het ‘wetenschappelijk’ determinisme empirisch testbaar maken door de eis te stellen dat fenomenen precies voorspeld kunnen worden door een rationele voorspeller op basis van beginvoorwaarden die met eindige precisie gekend zijn. Daarmee doet Popper de kern van het Laplaciaans determinisme teniet, aangezien bij Laplace enkel een hypothetische alwetendheid in staat is tot exact kennen en voorspellen. In het Laplaciaans determinisme zijn voorspellingen *in principe* mogelijk, bij Popper moeten ze ook praktisch uitvoerbaar zijn.

De doctrine van het ‘wetenschappelijk’ determinisme is onhoudbaar, omdat Popper eist dat de evolutie van *elk* gesloten fysisch systeem met *gelijk welke mate van precisie* voorspeld kan worden op basis van begincondities die met eindige precisie gekend zijn. Stellen dat fenomenen voorspeld kunnen worden met elke vereiste mate van precisie op basis van beginvoorwaarden die niet exact gekend zijn, is genoeg om het ‘wetenschappelijk’ determinisme onmogelijk te maken.¹⁷ Dit maakt Popper duidelijk aan de hand van een voorbeeld waar een gevoelige afhankelijkheid van begincondities optreedt.

14. Popper, *The Open Universe: An Argument for Indeterminism*, 35.

15. Popper, 33.

16. Popper, 30.

17. Popper, 34–35.

4.1.3 De puntmassa van Hadamard

Popper beschrijft een voorbeeld van de Franse wiskundige Jacques Hadamard dat duidelijker maakt waarom het ‘wetenschappelijk’ determinisme volgens hem niet kan gelden. Hadamard kwam eerder al aan bod in Hoofdstuk 3, bij de bespreking van de stabiliteit van het zonnestelsel (Sectie 3.1.1). Daar werd opgemerkt dat de stabiliteit van het zonnestelsel volgens Hadamard een *ill-posed* probleem is, aangezien de fysieke geldigheid van problemen die op een gevoelige manier afhangen van de begincondities beperkt is. Poincaré had eerder ook al op dit fenomeen gewezen (zie eveneens Hoofdstuk 3).

In een paper uit 1898 bespreekt Hadamard systemen die een gevoelige afhankelijkheid van beginvoorwaarden vertonen, waardoor onvoorspelbaarheid van eenvoudige mechanische systemen optreedt.¹⁸ Hadamard veronderstelt dat een puntmassa met constante snelheid beweegt over een oneindig negatief gekromd oppervlak. Een voorbeeld van zo’n negatief gekromd oppervlak is een zadel dat gebruikt wordt bij rijdieren. Typisch heeft zo’n zadel hogere zijkanen en een dal in het midden.¹⁹

Een puntmassa die vertrekt vanop de rand van een oneindig zadeloppervlak zal een traject doorlopen dat afhangt van de beginpositie. Stel nu dat de beginpositie exact gekend is, maar de richting waarin de puntmassa beweegt niet; deze richting kan variëren binnen een hoek α . Hadamard bewees dat er, binnen deze kleine variatie van de richting, twee mogelijke soorten banen zijn. Het eerste traject blijft steeds dicht in de buurt van het beginpunt. Het tweede mogelijke pad leidt oneindig ver weg van het beginpunt, i.e. de puntmassa bevindt zich op een traject naar oneindig.

Deze twee radicaal verschillende evoluties zijn het gevolg van een minimale afwijking van de richtingshoek. Zelfs met een exact gekende startpositie, levert een kleine afwijking van de richtingshoek α een totaal andere uitkomst. Popper: “(...) this means that no measurement of the initial *direction* of the track, however precise (short of absolute mathematical precision) can determine whether the mass-point is moving on an orbit, or else on a trajectory that eventually goes to infinity; not

¹⁸ Jacques Hadamard, “Les Surfaces à Courbures Opposées et Leurs Lignes Géodésiques”, *Journal de Mathématiques Pures et Appliquées* 4 (1898): 27–74.

¹⁹ Ter vergelijking: een vlak heeft geen kromming en een boloppervlak heeft een positieve kromming.

even on the unrealistic assumption that the initial *position* is given with absolute precision".²⁰

Popper concludeert uit Hadamards resultaat dat het onmogelijk is om vanuit een beginrichting die gekend is met eindige precisie met zekerheid te stellen dat het gevolgde traject niet naar oneindig zal leiden. Dat is een probleem omtrent de voorspelbaarheid van fenomenen; elke meting van de beginrichting schiet tekort om te kunnen zeggen welk traject de puntmassa zal volgen. De superieure wetenschapper van Popper zal er bijgevolg niet in slagen om correcte voorspellingen te doen.

Hadamard lijkt het Laplaciaans determinisme - of meer specifiek Poppers 'praktische versie' van het Laplaciaans determinisme - te weerleggen. Er lijkt immers geen enkele manier om de beweging van de puntmassa correct te voorspellen, aangezien een klein verschil in de richtingshoek totaal verschillende resultaten oplevert. Voor Popper is het duidelijk dat het determinisme van Laplace onhoudbaar is.

Het voorbeeld van de puntmassa is algemeen belangrijk met het oog op de stabiliteit van systemen. Indien de evolutie van n-deeltjessystemen, zoals bijvoorbeeld het zonnestelsel, afhankelijk is van zeer kleine, onmeetbare verschillen, dan is het onmogelijk te zeggen of deze stabiel zijn. Popper schrijft:

For, as Hadamard points out, no finite degree of precision of the initial conditions will allow us to predict whether or not a planetary system (of many bodies) will be stable in Laplace's sense. (...) With this, Hadamard refutes Laplace's result (...); a result which may well have been one of the main inspirations of Laplace's idea of 'scientific' determinism.²¹

Met deze laatste zin verwijst Popper naar Laplaces werk in de hemelmechanica. Zoals in Hoofdstuk 2 aan bod kwam, is het aannemelijk dat Laplace voor zijn stelling geïnspireerd werd door de regulariteit van de hemelmechanica en de mogelijkheid tot voorspelling die de astronomie bood. Laplace ging er bovendien van uit, gegeven de wetten van Newton, dat het zonnestelsel stabiel is.

²⁰. Popper, *The Open Universe: An Argument for Indeterminism*, 39.

²¹. Popper, 40.

Zoals in het vorige hoofdstuk reeds besproken, was in het werk van Poincaré echter al duidelijk geworden dat Laplaces conclusie over het zonnestelsel herzien moest worden. Poincaré bewees dat het onmogelijk is om te zeggen of het zonnestelsel op lange termijn stabiel is, omdat het (wiskundige) probleem in extreme mate afhangt van de begincondities. Het voorbeeld van Hadamard lijkt Laplaces determinisme niet te weerleggen, omdat een alwetende intelligentie wel over de exacte begincondities beschikt. Het determinisme dat Popper weerlegt is vooral zijn eigen versie van determinisme, dat gebaseerd is op de epistemologische notie van voorspelbaarheid (en niet op de *in principe* voorspelbaarheid van Laplace).

4.2 Bespreking

Is het inderdaad zo dat systemen die een gevoelige afhankelijkheid van begincondities vertonen het Laplaciaans determinisme onmogelijk maken? Popper laat na om een distictie tussen ontologie en epistemologie te maken. Het epistemologische aspect, ofwel het kennen van begincondities, wordt verward met een mogelijk ontologisch geldend determinisme. Met andere woorden: voor Popper lijkt er geen verschil tussen de *kennis* van de initiële condities door een observator en de initiële condities op zichzelf, los van de vraag of deze gekend zijn.

Ook Earman merkt deze verwarring op in het eerder aan bod gekomen *A Primer on Determinism* (1986). Earman stipt aan dat Hadamard over de gevoelige afhankelijkheid van begincondities het volgende stelde: "Everything takes place, physically speaking, as if the knowledge of [the initial] data would not determine the unknown function".²² Het lijkt slechts alsof determinisme faalt, omdat de onmogelijkheid tot exacte kennis van de beginvoorwaarden een precieze voorspelling in de weg zit. Poppers beschouwing gaat niet in op de "as if" van Hadamard in het citaat van zonet. Earman merkt daarom op dat "(...) the proper conclusion to be drawn from [Popper's] result is not that determinism fails, but rather that determinism and prediction need not work in tandem".²³

Zoals in Hoofdstuk 1 werd gezien is determinisme volgens Earman een ontologisch begrip; het is onafhankelijk van onze kennis van de wereld. Het indeterminisme dat Popper denkt aan te tonen is gebaseerd op het falen van exacte voorspellingen.

²². Earman, *A Primer on Determinism*, 9.

²³. Earman, 9.

Volgens Earman wil dat niet zeggen dat determinisme ongeldig is indien het gelijkgesteld wordt aan het optreden van een unieke evolutie. Het onvoldoende kennen van de begincondities is een epistemologisch probleem, dat los kan staan van een ontologisch geldend determinisme.

Hoewel Popper in het licht van menselijke vrijheid zijn eigen agenda had om voor indeterminisme te pleiten, is het merkwaardig dat hij determinisme definieert in termen van praktische voorspelbaarheid en daarbij denkt dicht bij het Laplaciaans determinisme te blijven. Het oorspronkelijke idee van Laplace gaat in het ‘wetenschappelijk’ determinisme immers verloren: bij Laplace zijn voorspellingen *in principe* mogelijk, maar daarom niet in de praktijk. Dit werd eerder in Hoofdstuk 2 uitgebreid besproken.

Poppers ‘wetenschappelijk’ determinisme zou eventueel gezien kunnen worden als een reactie op het gangbare idee dat de klassieke natuurkunde deterministisch - en dus voorspelbaar - was. Hij stelde immers: “Classical physics (...) is usually taken to be deterministic in the sense that it implies the predictability, with any desired degree of precision, of every single physical event, on the basis of sufficiently precise initial information.”²⁴ Door de onvoorspelbaarheid van fenomenen als de puntmassa van Hadamard, zou volgens Poppers redenering indeterminisme volgen in de klassieke natuurkunde. Deze conclusie berust dan echter op de misvatting dat determinisme en voorspelbaarheid (in praktische zin) elkaar impliceren.

4.3 Conclusie

We hebben gezien dat Popper met het ‘wetenschappelijk’ determinisme een testbare vorm van het Laplaciaans determinisme introduceert. Het ‘wetenschappelijk’ determinisme wordt gekenmerkt door een voorspeller die beginvoorwaarden slechts met eindige precisie kan kennen. Vervolgens toont Popper aan dat het ‘wetenschappelijk’ determinisme, en daarmee ook het Laplaciaans determinisme, onhoudbaar is. Hoe legitiem is de conclusie van Popper echter?

Het lijkt erop dat Popper zijn eigen ‘wetenschappelijk’ determinisme heeft ontkracht, maar niet het determinisme van Laplace. Wat Popper doet, is het Laplaciaans determinisme zodanig vervormen dat de kern van Laplace niet langer

²⁴ Karl R. Popper, “Indeterminism in Quantum Physics and in Classical Physics”, *The British Journal for the Philosophy of Science* 1, no. 3 (1950): 117.

aanwezig is. De *in principe* voorspelbaarheid verdwijnt en wordt vervangen door een praktische voorspelbaarheid die een menselijke 'superwetenschapper' zou kunnen bereiken. Aangezien de voorspellingen van deze laatste gebaseerd zijn op beginvoorwaarden die met eindige precisie gekend zijn, faalt het 'wetenschappelijk' determinisme bij systemen die extreem afhangen van de begincondities voor hun verdere evolutie.

Als een voorspeller geen exacte voorspellingen kan doen, betekent dat louter dat absolute voorspelbaarheid faalt. Zoals het ontologisch-epistemologisch onderscheid echter laat zien, kan determinisme als unieke evolutie nog steeds gelden indien voorspellingen onmogelijk zijn. In het volgende hoofdstuk wordt deze onderscheiding verder doorgetrokken in het licht van deterministische chaos. In de chaostheorie is de distinctie tussen determinisme als ontologisch begrip en voorspelbaarheid als epistemologisch begrip nog duidelijker geworden.

Hoofdstuk 5

Deterministische chaos

In de voorgaande hoofdstukken werd gezien hoe de relatie tussen determinisme en voorspelbaarheid geproblematiseerd is. Met de opkomst van de chaostheorie in de jaren '60 van de vorige eeuw wordt deze breuk nog groter. De chaostheorie plaatst strikte limieten op voorspelbaarheid. Hoewel de onmogelijkheid tot exacte kennis van de beginvoorwaarden een precieze voorspelling in de weg zit, is er onderliggend wel een evolutie aan de gang die beschreven wordt door vastgestelde wiskundige wetten. Deze unieke wiskundige evolutie bestaat naast een epistemologische onvoorspelbaarheid.

De opbouw van dit hoofdstuk ziet er als volgt uit. In Sectie 5.1 wordt een eenvoudig voorbeeld gegeven van chaotisch gedrag, waardoor duidelijk wordt hoe onvoorspelbaarheid in een deterministisch systeem kan optreden. Vervolgens wordt opgemerkt dat de gevoelige afhankelijkheid van begincondities een belangrijke rol speelt — een observatie die eerder al bij Poincaré aan bod kwam. Poincaré wordt ook wel genoemd als de ontdekker van chaos, maar dat is onterecht (Sectie 5.2). Zoals gezien zal worden in Sectie 5.3 wordt de ontdekking van de chaostheorie gewoonlijk rond 1960 gesitueerd, wanneer meteoroloog Edward Lorenz (1917-2008) een opvallende onvoorspelbaarheid vaststelt bij de zogenaamde Lorenzvergelijkingen. Vervolgens wordt chaos in Sectie 5.4 wiskundig preciezer gedefinieerd. Op basis van deze definitie worden in Sectie 5.5 tenslotte de gevolgen van de chaostheorie op voorspelbaarheid duidelijk gemaakt.

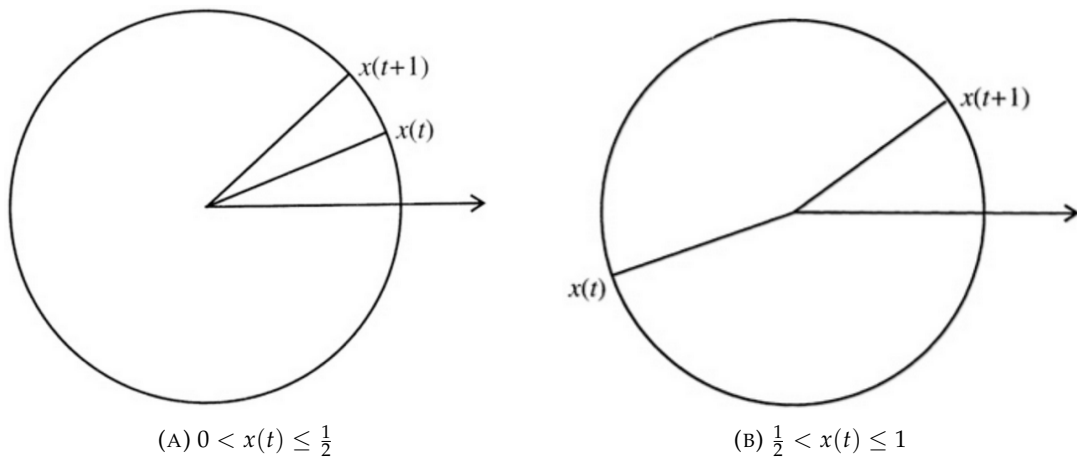
5.1 Een deterministisch onvoorspelbaar systeem

Een eenvoudig voorbeeld illustreert hoe deterministische evolutie kan uitmonden in onvoorspelbaarheid.¹ Beschouw een punt op een cirkel. Bij elke tijdstap verplaatst het punt zich over een hoek die telkens verdubbeld wordt. De positie van het punt wordt daarbij voorgesteld door een getal $x(t)$ tussen 0 en 1, waarbij 0 en 1 dezelfde positie op de cirkel aanduiden. Tussen beide zit een volledige draai rond de cirkel, ofwel een verschil van 2π .

Afhankelijk van waar het punt zich bevindt, wordt de evolutie $x(t)$ gegeven door de volgende vergelijkingen.

$$x(t+1) = \begin{cases} 2x(t) & \text{als } 0 < x(t) \leq \frac{1}{2} \\ 2x(t) - 1 & \text{als } \frac{1}{2} < x(t) \leq 1 \end{cases}$$

Het punt zal dus telkens over het dubbele van de vorige hoek bewegen. Beide vergelijkingen drukken dezelfde verdubbeling uit, met dat verschil dat de tweede vergelijking er ook voor zorgt dat het punt nooit buiten het bereik $[0,1]$ valt. Een visuele representatie van $x(t)$ naar $x(t+1)$ bij verschillende waarden van $x(t)$ is weergegeven in Figuur 5.1.



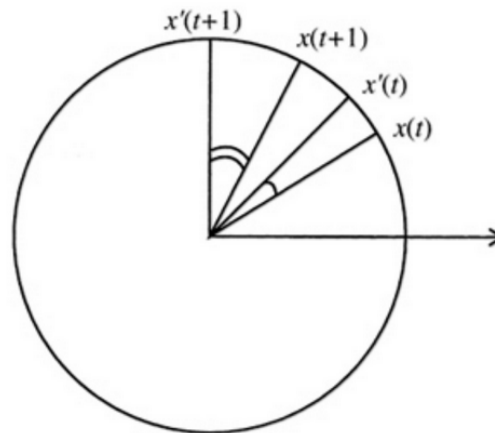
FIGUUR 5.1: Evolutie van $x(t)$ naar $x(t+1)$ bij verschillende waarden van $x(t)$.²

In Figuur 5.2 wordt de invloed van kleine afwijkingen geïllustreerd op de beginwaarde. Stel dat $x(t)$ en $x'(t)$ twee dicht bij elkaar liggende beginwaarden

1. Adrien Douady, "Déterminisme et Indéterminisme dans un Modèle Mathématique", in *Chaos et Déterminisme*, geredigeerd door A. Dahan Dalmedico, J.-L. Chabert en K. Chemla (Parijs: Éditions du Seuil, 1992), 12–13.

2. Figuur uit Douady, 12–13.

zijn. Na één tijdstap is het verschil tussen $x(t+1)$ en $x'(t+1)$ verdubbeld, zoals te zien op de figuur.



FIGUUR 5.2: De afwijking tussen $x(t)$ en $x'(t)$ na één tijdstap.³

Bij elke tijdstap wordt de afwijking tussen de evoluties van $x(t)$ en $x'(t)$ verder verdubbeld. Na 10 tijdstappen bijvoorbeeld wordt een fout van één duizendste op de initiële positie van $x(t)$ versterkt tot een verschil van bijna 1, wat de hele cirkel is. Voor een voorspelling na 50 stappen die tot op 0,5 nauwkeurig is (de helft van de cirkel) zou men de beginwaarde moeten kennen tot op 10^{-15} nauwkeurig, iets wat met geen enkele fysieke meting haalbaar is.⁴

Hoewel het systeem volledig deterministisch is (het gedraagt zich geheel volgens de gegeven vergelijkingen), zijn de uitkomsten in de praktijk op langere termijn onvoorspelbaar. Kleine onnauwkeurigheden bij de bepaling van de begintoestand worden immers groter doorheen de tijd: er wordt een gevoelige afhankelijkheid van de begincondities waargenomen.

5.2 Poincaré en de gevoelige afhankelijkheid van begincondities

In Hoofdstuk 3 werd gezien dat Poincaré reeds wees op de gevoelige afhankelijkheid van begincondities. Poincaré beschreef hoe instabiele evenwichtssituaties aanleiding kunnen geven tot onvoorspelbaarheid. Hij merkte daarbij op dat kleine temperatuursverschillen in de atmosfeer kunnen resulteren in wervelstormen met enorme windsnelheden. Het is echter onmogelijk om te voorspellen

³. Figuur uit Douady, "Déterminisme et Indéterminisme dans un Modèle Mathématique", 13.

⁴. Douady, 13.

waar deze wervelstormen zullen plaatsvinden, omdat de temperatuursverschillen onvoldoende precies gekend zijn.

In deze beschrijving in *Science et Méthode*⁵ (1908) stelt Poincaré dat kleine oorzaken grote effecten kunnen teweegbrengen. Dit fenomeen staat vandaag bekend als het ‘vlindereffect’, wat in de populaire literatuur soms als synoniem gezien wordt voor de chaostheorie. De metafoor van de vlinder wijst erop dat een kleine luchtverplaatsing, zoals veroorzaakt door de beweging van een vlindervleugel, kan resulteren in een tornado aan de andere kant van de wereld.⁶

Is de chaostheorie dan een herontdekking van de ideeën van Poincaré? Nee, het vlindereffect uit de populaire literatuur is geen synoniem van de chaostheorie. Het licht slechts één aspect van de chaostheorie in het bijzonder uit: de gevoelige afhankelijkheid van begincondities ofwel *sensitive dependence on initial conditions* (SDIC), zoals daarnet in het voorbeeld ook aan bod kwam.⁷ SDIC wordt gezien als een belangrijke voorwaarde, maar zoals straks besproken zal worden, is dit niet het enige kenmerk van wat vandaag de chaostheorie genoemd wordt.

Daarnaast lopen definities van SDIC uiteen. Er zijn mildere en sterkere versies van SDIC, die variëren in de snelheid waarmee de trajecten van naburige begincondities divergeren. Een vaak gevolgde definitie van ‘gevoelige afhankelijkheid’ wordt gegeven door Devaney (1992).⁸

A dynamical system F depends sensitively on initial conditions if there is a $\beta > 0$ such that for any x and any $\epsilon > 0$ there is a y within ϵ of x and a k such that the distance between $F^k(x)$ and $F^k(y)$ is at least β .

Hierin is $F^k(x)$ het resultaat van een aantal iteraties van de functie met zichzelf, i.e. $F(F(F(\dots F(x))))$. Het gehele getal k geeft aan hoeveel keer de functie met zichzelf werd geïtereerd.⁹

Merk op dat niet gezegd wordt hoe *snel* de trajecten van naburige punten divergeren. Daarom is deze formulering van SDIC eerder mild te noemen. Sterkere versies van SDIC zullen vereisen dat de snelheid waarmee de trajecten divergeren

5. Henri Poincaré, *Science et Méthode* (Parijs: Flammarion, 1908).

6. Edward N. Lorenz, *The Essence of Chaos* (Seattle: University of Washington Press, 1995), 181–184.

7. Dahan Dalmedico, “Chaos, Disorder, and Mixing: A New Fin-de-Siècle Image of Science”, 71–72.

8. Robert L. Devaney, *A First Course in Chaotic Dynamical Systems* (Reading: Addison-Wesley, 1992), 117.

9. Neem bijvoorbeeld $F(x) = 2x$. Met $k = 1$ is $F^1(x) = F(F(x)) = F(2x) = 4x$.

exponentieel moet zijn. Deze toevoeging wordt echter niet algemeen vereist, aangezien exponentiële divergentie voor naburige begincondities niet geldt voor alle chaotische systemen.¹⁰ In de literatuur wordt om deze reden hoofdzakelijk de definitie van Devaney gevolgd.¹¹

Hoewel Poincaré de chaostheorie niet beschreven heeft zoals die vandaag begrepen wordt, zou in zekere zin wel kunnen gezegd worden dat Poincaré de ‘grootvader’ van de moderne chaostheorie is. Naast het feit dat hij het idee populariseerde dat kleine oorzaken grote effecten kunnen hebben, worden zijn inzichten bij het reeds in Hoofdstuk 3 besproken drielichamenprobleem gebruikt om chaos op wiskundig niveau te begrijpen.¹² Sommige auteurs (zie bijvoorbeeld Diacu en Holmes¹³) noemen Poincaré op basis van deze bijdrage de ontdekker van de chaostheorie, maar daar is discussie over.¹⁴ Hét cruciale moment in de ontwikkeling van de chaostheorie vindt niet bij Poincaré plaats, maar vele jaren later in de jaren '60 van de vorige eeuw.¹⁵

5.3 De Lorenzvergelijkingen

Het zonet aan bod gekomen ‘vlindereffect’ wordt toegeschreven aan meteoroloog Edward Lorenz. Lorenz wordt gezien als de pionier van de chaostheorie. Hoewel Lorenz de term ‘vlindereffect’ niet gebruikte, is de associatie met de vlinder wel bij hem te vinden. Lorenz gebruikte het symbool van de vlinder voor het eerst in 1972, toen hij bij een internationaal onderzoeksproject over meteorologie een lezing gaf met de titel “Predictability: Does the Flap of a Butterfly’s Wings in Brazil Set Off a Tornado in Texas?”.¹⁶

Zo’n tiental jaar eerder, in 1963, had Lorenz een aantal simulaties uitgevoerd van een systeem van differentiaalvergelijkingen die gebaseerd waren op convectie in de

10. Charlotte Werndl, “What Are The New Implications of Chaos for Unpredictability?”, *The British Journal for the Philosophy of Science* 60 (2009): 206.

11. Parker, “Did Poincaré Really Discover Chaos?”, 579.

12. Parker, 587.

13. Diacu en Holmes, *Celestial Encounters: The Origins of Chaos and Stability*.

14. Parker, “Did Poincaré Really Discover Chaos?”, 587.

15. Dahan Dalmedico, “Chaos, Disorder, and Mixing: A New Fin-de-Siècle Image of Science”, 71–72.

16. Lorenz, *The Essence of Chaos*, 181–184.

atmosfeer. De zogenaamde Lorenzvergelijkingen zien er als volgt uit:^{17,18}

$$\begin{aligned}\frac{dx}{dt} &= \sigma(y - x) \\ \frac{dy}{dt} &= rx - y - xz \\ \frac{dz}{dt} &= xy - bz.\end{aligned}$$

Dit dynamische systeem wordt beschreven door drie niet-lineaire differentiaalvergelijkingen, met parameters σ , r en b groter dan 0.

Het systeem van Lorenz is deterministisch, in die zin dat het beschreven wordt door de gegeven differentiaalvergelijkingen. Verder is gegarandeerd dat differentiaalvergelijkingen (indien de beschouwde functies continu zijn) unieke oplossingen hebben onder gegeven beginvoorwaarden. Deze eigenschap wordt ook wel de existentie- en uniciteitsstelling genoemd.¹⁹

Lorenz stelde echter vast dat het systeem op lange termijn onvoorspelbaar was. Hij simuleerde oplossingen van deze vergelijkingen voor een gegeven aantal begincondities. Daarbij stelde hij de parameters vast op $\sigma = 10$, $b = \frac{8}{3}$, $r = 28$.²⁰ Met behulp van numerieke simulatie kon hij inzien dat zeer dicht bij elkaar liggende begincondities verschillende oplossingen boden. Dit is opnieuw een geval van de gevoelige afhankelijk van begincondities die eerder besproken werd.

Bovendien stelde Lorenz vast dat de oplossingen aperiodisch waren. De beginconditie $(0, 1, 0)$ leverde bijvoorbeeld voor $y(t)$ een ontwikkeling zoals afgebeeld in Figuur 5.3. Zoals te zien is deze oplossing aperiodisch, wat betekent dat ze zichzelf nooit herhaalt.²¹

¹⁷. Dezelfde vergelijkingen kunnen ook gebruikt worden voor lasermodellen of het gekende Lorenz waterwiel. Dit laatste is een verticaal geplaatst rad waarin bakken met water roteren die gevuld worden en tegelijk geleegd worden d.m.v. een gat in de bodem. De beweging van het wiel is een voorbeeld van chaotisch gedrag (zie Strogatz, *Nonlinear Dynamics and Chaos: With Applications to Physics, Biology, Chemistry, and Engineering*, 309–310).

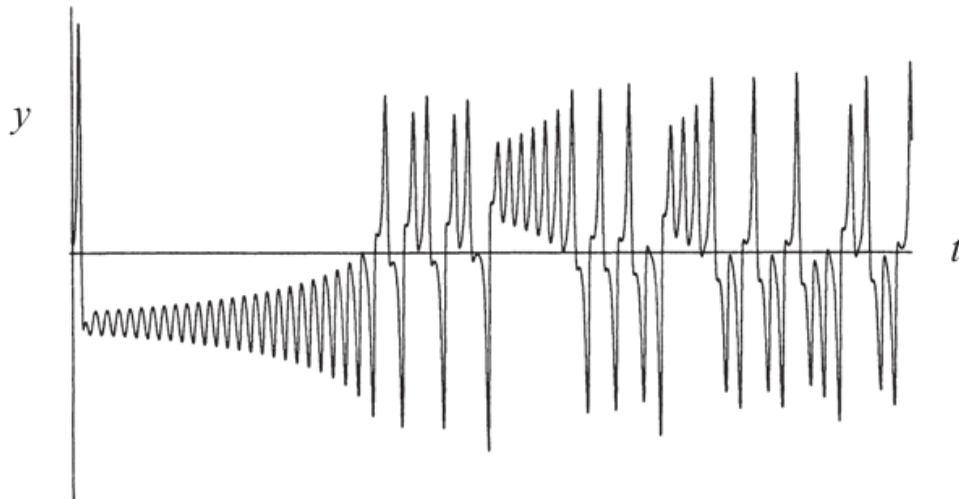
¹⁸. Edward N. Lorenz, "Deterministic Nonperiodic Flow", *Journal of Atmospheric Sciences* 20, no. 2 (1963): 135.

¹⁹. Strogatz, *Nonlinear Dynamics and Chaos: With Applications to Physics, Biology, Chemistry, and Engineering*, 27.

²⁰. Lorenz, "Deterministic Nonperiodic Flow", 136.

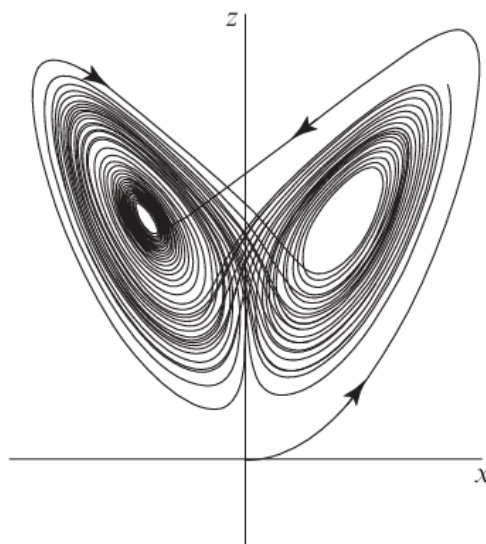
²¹. Strogatz, *Nonlinear Dynamics and Chaos: With Applications to Physics, Biology, Chemistry, and Engineering*, 331.

²². Figuur uit Strogatz, 326.



FIGUUR 5.3: De oplossingen van de Lorenzvergelijkingen zijn aperiodisch, zoals te zien bij de evolutie van $y(t)$.²²

Daarnaast ontdekte Lorenz de zogenaamde 'strange attractor': een onderliggende structuur die alle oplossingen leek te kenmerken.²³ Deze structuur wordt in twee dimensies in Figuur 5.4 afgebeeld. Een enkel punt op de structuur stelt de positie en de snelheid van het systeem voor op een bepaald moment. Deze voorstelling, waarin de verschillende toestanden worden afgebeeld die het systeem doorloopt, wordt ook wel de 'faseruimte' genoemd (in Sectie 5.4 wordt deze term wiskundig preciezer gemaakt).



FIGUUR 5.4: De 'strange attractor' van Lorenz, afgebeeld in twee dimensies.²⁴

²³. Deze term werd niet door Lorenz bedacht, maar door Ruelle en Takens in 1971 (zie Strogatz, *Nonlinear Dynamics and Chaos: With Applications to Physics, Biology, Chemistry, and Engineering*, 327).

²⁴. Figuur uit Strogatz, 326.

Voor alle begincondities ziet de structuur er hetzelfde uit, alleen is niet te voorspellen op welke manier het patroon tot stand zal komen. Het traject in de faseruimte ziet er globaal hetzelfde uit, maar evolueert onvoorspelbaar. Stel bijvoorbeeld dat het traject in de faseruimte dicht bij de oorsprong start, dan zou het eerst naar links kunnen gaan en dan naar rechts, of omgekeerd. Ook is niet te voorspellen wanneer het traject terug naar de andere kant zal gaan; het aantal circuits varieert willekeurig. Merk op dat, hoewel het op Figuur 5.4 zo lijkt, het traject zichzelf op geen enkel punt kruist. Volgens de eerder genoemde existentie- en uniciteitsstelling is het onmogelijk dat een punt in de faseruimte tweemaal wordt bezocht. Indien dit wel zo zou zijn, zou de evolutie niet uniek zijn.

Omwille van dit gedrag wordt ook wel gesproken van macro-voorspelbaarheid en micro-onvoorspelbaarheid. De globale structuur is voorspelbaar, de ontwikkeling van de structuur — het daadwerkelijk gevolgde traject in de faseruimte — is onvoorspelbaar.²⁵ Door het optreden van micro-onvoorspelbaarheid in Lorenz' atmosferische systeem zijn weersvoorspellingen op lange(re) termijn onbetrouwbaar. Desondanks ging ook Lorenz uit van determinisme. Hij stelde bijvoorbeeld over zijn systeem: "It should be noted that these conclusions do not depend upon whether or not the atmosphere is deterministic."²⁶

Hoewel er bij Lorenz sprake is van macro-voorspelbaarheid en micro-onvoorspelbaarheid, is deze combinatie geen algemeen kenmerk van chaotische systemen.²⁷ Het hoekverdubbelingsvoorbeeld in Sectie 5.1 bevat bijvoorbeeld geen 'strange attractor'. Welke algemene conclusies vallen er dan te trekken bij chaotische systemen wat betreft voorspelbaarheid?

Alvorens te gaan naar een bespreking van de algemene implicaties van chaos op voorspelbaarheid, wordt een wiskundig precieze definitie gegeven van chaos. Er wordt daarin duidelijk dat chaos naast SDIC nog door een andere essentiële eigenschap wordt gekenmerkt: 'dichtheid' (*denseness*).²⁸ Op basis van deze twee kenmerken wordt in Sectie 5.5 tenslotte geconcludeerd wat de implicaties zijn van de chaostheorie op voorspelbaarheid.

25. Werndl, "What Are The New Implications of Chaos for Unpredictability?", 211.

26. Lorenz, "Deterministic Nonperiodic Flow", 141.

27. Werndl, "What Are The New Implications of Chaos for Unpredictability?", 212.

28. Werndl, 203.

5.4 Chaos definiëren

Een wiskundig strikte definitie van chaos ziet er als volgt uit.²⁹ Merk op dat deze definitie enkel geldt voor systemen die discreet evolueren in de tijd. Een discrete tijd wil zeggen dat enkel tijdstippen $t, t + 1, t + 2$, etc. worden beschouwd, met t een geheel getal. Een voorbeeld van een discreet systeem kwam in Sectie 5.1 aan bod. Het systeem van Lorenz was een voorbeeld van een continu systeem. De definitie kan echter eenvoudig worden uitgebreid naar continue systemen³⁰.

Definieer de faseruimte X van een systeem als de ruimte waarin alle mogelijke toestanden die het systeem doorloopt in de tijd worden voorgesteld door een punt. Een enkel punt in de faseruimte stelt dan de positie en de snelheid van het systeem voor op een bepaald moment.

Beschouw een systeem dat wordt voorgesteld door het punt x_0 op tijdstip $t = 0$. De evolutie van het systeem per tijdstap in de faseruimte X wordt gegeven door F . Het punt wordt op een ander tijdstip t voorgesteld door het punt $x_t = F_t(x_0) = F(F\dots F(F(x_0)))$ waarbij de iteratie t keer wordt uitgevoerd.

Zij K een deelverzameling van de faseruimte X . K is invariant onder (F_t) voor $t > 0$. Met andere woorden: $\forall x \in K, \forall t > 0, F_t(x) \in K$. Men zegt dan dat F chaotisch is op K als de volgende drie voorwaarden vervuld zijn:

1. Er is gevoeligheid voor beginvoorwaarden;
2. K bevat een dichte baan;
3. Periodieke punten zijn dicht.

Met de term ‘dicht’ wordt gerefereerd naar de afstand in de faseruimte. De tweede voorwaarde betekent dan specifiek dat er minstens één baan door de hele faseruimte loopt die willekeurig dicht bij elk punt in de faseruimte komt. Dit betekent ook wel dat de baan ‘verspreid’ is door de gehele faseruimte. In het voorbeeld in Sectie 5.1 betekent dit dat de evolutie van $x(t)$ in de faseruimte na verloop van tijd alle mogelijke getallen tussen 0 en 1 (de waardes op de cirkel) willekeurig dicht zal naderen. Dit betekent dat $x(t)$ op termijn de gehele faseruimte zal bereiken.

²⁹. Douady, “Déterminisme et Indéterminisme dans un Modèle Mathématique”, 17.

³⁰. Zie bijvoorbeeld Parker, “Did Poincaré Really Discover Chaos?”, 579–580.

De derde voorwaarde betekent dat er voor elk punt in de faseruimte een periodiek punt bestaat dat er willekeurig dicht bij ligt.³¹ Een periodiek punt is een toestand waarnaar het systeem terugkeert. Hoewel het gedrag chaotisch is, zijn er dus wel toestanden die na een bepaalde tijd terugkeren. De aanwezigheid van periodieke punten betekent echter niet dat het systeem in zijn geheel periodiek is. Bij het starten op een willekeurige plek in de faseruimte zal de afgelegde baan wel degelijk aperiodiek zijn. Dit concept werd eerder duidelijk gemaakt aan de hand van de Lorenzvergelijkingen.

Merk nogmaals op dat de 'strange attractor', die eerder in verband gebracht werd met macro-voorspelbaarheid, in deze definitie niet genoemd wordt. Het voorkomen van een 'strange attractor' is geen kenmerk dat bij alle chaotische systemen aanwezig is.³² In de structuur van de 'strange attractor' is echter wel sprake van dichtheid aangezien de trajecten willekeurig dicht naast elkaar liggen.

5.5 Chaos en onvoorspelbaarheid

Aangezien de combinatie van micro-onvoorspelbaarheid en macro-voorspelbaarheid niet algemeen optreedt voor chaotische systemen, definieert C. Werndl in *What Are The New Implications of Chaos for Unpredictability?* (2009) een nieuwe term om de onvoorspelbaarheid van chaotische systemen te duiden: *mixing*. De term *mixing* verwijst naar een samenspel van SDIC en dichtheid.

Mixing wijst erop dat een gegeven bundel van begincondities zich (exponentieel snel) zal verspreiden over de faseruimte. Werndl maakt dit intuïtief door de vergelijking te maken met de verspreiding van een druppel inkt in een glas water.³³ Wanneer een druppel inkt in een glas water wordt gedaan, zal de druppel zich verspreiden over het gehele glas water. De verspreiding van de druppel komt overeen met de eigenschap dichtheid, aangezien de inkt na verloop van tijd homogeen in het water verdeeld zal zijn. Tegelijk wijst deze verspreiding op SDIC, i.e. een druppel inkt (of een bundel begincondities) zal zich na een gegeven tijd aanzienlijk verder van de beginpositie bevinden. Deze divergentie kan exponentieel gebeuren, maar dat is geen vereiste voor chaotisch gedrag.³⁴ (De mildere en sterkere

31. Parker, "Did Poincaré Really Discover Chaos?", 578.

32. Werndl, "What Are The New Implications of Chaos for Unpredictability?", 212.

33. Werndl, 205.

34. Werndl, 210.

varianten van SDIC werden eerder reeds opgemerkt bij de wiskundige definitie van SDIC, zie Sectie 5.2.)

In essentie beschrijft *mixing* dan een verlies van informatie. Werndl geeft aan dat de onvoorspelbaarheid bij chaotische systemen voortkomt uit de irrelevantie van eerdere informatie om het toekomstige gedrag van een systeem te voorspellen. Door *mixing*, i.e. het (snel) verspreiden van een bundel begincondities over de gehele faseruimte, is het kennen van begincondities die te ver in het verleden liggen irrelevant. Werndl vat dit als volgt samen: "Hence, mixing means that for predicting an arbitrary event at an arbitrary level of precision $\epsilon > 0$, any sufficiently past event is approximately probabilistically irrelevant".³⁵ Mixing, ofwel de combinatie van SDIC en dichtheid, zorgt er dus voor dat (beperkte) kennis van de begincondities in de praktijk niet betekent dat de waarschijnlijkheid groter (of kleiner) is dat de toestand van een systeem zich op een later moment in een bepaalde regio van de faseruimte zal bevinden.³⁶

In de chaostheorie is het niettemin (theoretisch) zo dat dezelfde beginvoorwaarden tot dezelfde wiskundige evolutie leiden. In een realistisch wereldbeeld is exacte kennis van de beginvoorwaarden echter onmogelijk, waardoor voorspelling faalt bij chaotische systemen. Werndl wijst er inderdaad op dat het onmogelijk is om begincondities exact te kennen; er kan niet uitgegaan worden van een precieze beginconditie, maar van een uitgebreide(re) regio in de faseruimte waarin de beginconditie zich bevindt.³⁷ In de chaostheorie kan daarom expliciet een onderscheid gemaakt worden tussen een wiskundig geldend determinisme en een epistemologische onvoorspelbaarheid. Voorspelling wordt dan onmogelijk door de combinatie van (1) inexacte beginvoorwaarden en (2) irrelevantie van diezelfde inexacte beginvoorwaarden na een bepaalde tijd.

5.6 Conclusie

Zoals gezien zijn chaotische systemen deterministisch in die zin dat dezelfde beginvoorwaarden dezelfde wiskundige evolutie geven. Tegelijkertijd is het onmogelijk om de beginvoorwaarden bij fysische systemen met exacte precisie te kennen. De chaostheorie plaatst zo strikte limieten op voorspelbaarheid.

³⁵. Werndl, "What Are The New Implications of Chaos for Unpredictability?", 215.

³⁶. Werndl, 202.

³⁷. Werndl, 215.

Hoewel de onmogelijkheid tot exacte kennis van de beginvoorwaarden een precieze voorspelling in de weg zit, is er onderliggend wel een evolutie aan de gang die beschreven wordt door vastgestelde wiskundige wetten.

In de chaostheorie ontstaat er een spanning tussen een ontologisch determinisme en een epistemologische onvoorspelbaarheid. Chaotische systemen worden deterministisch beschreven in termen van (differentiaal)vergelijkingen, zoals bijvoorbeeld het systeem van Lorenz, maar vertonen toch onvoorspelbaar gedrag. Er kan ook wel gezegd worden dat het systeem deterministisch is, maar niet determineerbaar (in de zin van fysisch meetbaar, berekenbaar of voorspelbaar) met willekeurige precisie.³⁸ Het determinisme waarvan sprake verwijst naar een ontologische beschrijving, terwijl de geziene onvoorspelbaarheid op epistemologische limitaties wijst.

³⁸. Atmanspacher, "Determinism is Ontic, Determinability is Epistemic", 63.

Hoofdstuk 6

Conclusie

De relatie tussen determinisme en voorspelbaarheid blijkt, in het licht van de historische en filosofische ontwikkeling sinds Laplace, fundamenteel te zijn verschoven. De onderzoeksvraag, “Hoe is de samenhang tussen determinisme en voorspelbaarheid (ontologisch en epistemologisch) verschoven sinds Laplace?”, kan nu als volgt worden beantwoord. Wat begon als een ontologische overtuiging over volledige voorspelbaarheid, is geëindigd in een onderscheid tussen wat de werkelijkheid is (ontologie) en wat wij erover kunnen weten (epistemologie).

Laplace verbond determinisme aan een *in principe* voorspelbaarheid, geworteld in het principe van voldoende grond en geïnspireerd door het succes van de Newtoniaanse mechanica. De alwetende intelligentie waarover Laplace schrijft, symboliseerde een ideaalbeeld, waarin volledige kennis leidt tot volledige voorspelbaarheid. Vanwege deze link met voorspelbaarheid heeft het Laplaciaans determinisme, naast een ontologische basis, ook een sterke epistemologische connotatie.

Bij Poincaré werd de *in principe* voorspelbaarheid van Laplace genuanceerd. Wetmatigheden zijn voor Poincaré benaderingen van de werkelijkheid, geen exacte beschrijvingen ervan. Poincaré begreep determinisme als een aanname in de wetenschap: er wordt *a priori* van uitgegaan dat determinisme bestaat en succesvolle voorspellingen kunnen determinisme (*a posteriori*) bevestigen. Determinisme kan bij Poincaré gezien worden als een methodologisch principe, in die zin dat voorspelbaarheid erop wijst dat theorieën de werkelijkheid goed beschrijven. Omgekeerd kan het falen van voorspellingen aangeven dat een betere theorie gevonden kan worden, al wees Poincaré ook op het belang van beginvoorwaarden en hun invloed op voorspellingen bij systemen die hier gevoelig aan zijn.

Net als Poincaré kan Popper Laplaces versie van determinisme niet geheel accepteren. Popper gaat een stap verder dan Poincaré en maakte het Laplaciaans determinisme testbaar. Als voorspelbaarheid faalt bij bekende natuurwetten en bekende begincondities (gegeven met eindige precisie), dan hebben we redenen om determinisme te verwerpen. Popper draait de Laplaciaanse logica om: geen voorspelbaarheid betekent geen determinisme. Met Poppers benadering van determinisme lijkt een essentieel aspect van het Laplaciaans determinisme verloren te gaan. Een onderscheid tussen ontologie en epistemologie, wat bij Poincaré reeds aanwezig was, lijkt noodzakelijk om het idee van determinisme te kunnen behouden.

Met de opkomst van de chaostheorie wordt er een sterke kloof duidelijk tussen determinisme en voorspelbaarheid. Chaotische systemen zijn deterministisch in strikte wiskundige zin, maar in de praktijk onvoorspelbaar. De gevoeligheid voor begincondities en de beperkte meetprecisie maken praktische voorspelbaarheid onmogelijk. Zo ontstaat een spanning tussen een ontologisch determinisme (dezelfde beginvoorwaarde, dezelfde evolutie) en epistemologische beperkingen (onvoldoende kennis van de exacte beginconditie om te voorspellen).

Het antwoord op de onderzoeksvraag luidt dan ook dat de samenhang tussen determinisme en voorspelbaarheid fundamenteel is verschoven: van een aanvankelijk samenvallend begrip (waarbij determinisme *in principe* voorspelbaarheid inhield), naar een tweedeling waarbij determinisme als ontologische doctrine losstaat van epistemologische beperkingen. Deze ontwikkeling weerspiegelt niet enkel een filosofische herdefiniëring, maar ook een wetenschappelijke: de studie van chaotische systemen toont dat de wereld deterministisch kan zijn zonder daarmee voorspelbaar te zijn.

Via deze conclusie kan de hedendaagse kijk op determinisme begrepen worden. Bij auteurs als Earman en Butterfield wordt determinisme radicaal losgemaakt van elk epistemologisch kader: voorspellingen spelen geen rol meer in de definitie, maar behoren hoogstens tot de implicaties. De positionering van determinisme als een eigenschap van theorieën of mogelijke werelden creëert ruimte om systemen te begrijpen als strikt bepaald, zonder dat daaruit noodzakelijk volgt dat ze ook voorspelbaar zijn.

Hoewel de hedendaagse definities epistemologisch neutraal zijn, maakt het volledig

loslaten van voorspelbaarheid het begrip determinisme moeilijker voorstelbaar. Waar Laplace met zijn alwetende intelligentie een tot de verbeelding sprekend beeld schetst van wat determinisme zou kunnen betekenen, bieden concepten als theoretische modellen en mogelijke werelden minder houvast. De hedendaagse, puur ontologische definities zijn abstracter en daardoor moeilijker te verbinden met onze ervaring van de wereld. In die zin blijft *in principe* voorspelbaarheid, ondanks haar epistemologische connotatie, een nuttig intuïtief concept, terwijl de ontologische lezing van determinisme ongrijpbaar blijft.

Bibliografie

- Agassi, Joseph. "Versions of Determinism". *Metascience: Scientific General Discourse* 2 (2022): 250–260.
- Atmanspacher, Harald. "Determinism is Ontic, Determinability is Epistemic". In *Between Chance and Choice: Interdisciplinary Perspectives on Determinism*, geredigeerd door Harald Atmanspacher en Robert Bishop, 49–74. Exeter: Imprint Academic, 2002.
- Barrow-Green, June. *Poincaré and the Three Body Problem*. Providence: American Mathematical Society, 1997.
- Biot, Jean-Baptiste. *Analyse du Traité de Mécanique Céleste de P. S. Laplace*. Parijs: Duprat, 1800.
- Bishop, Robert. "On Separating Predictability and Determinism". *Erkenntnis* 58, no. 2 (2003): 169–188.
- Butterfield, Jeremy N. "Determinism and Indeterminism". *Routledge Encyclopedia of Philosophy* 3 (2005): 33–39.
- Chabert, Jean-Luc en Amy Dahan Dalmedico. "Les Idées Nouvelles de Poincaré". In *Chaos et déterminisme*, geredigeerd door A. Dahan Dalmedico, J.-L. Chabert en K. Chemla, 274–305. Parijs: Éditions du Seuil, 1992.
- Clark, Peter. "Popper on Determinism". *Royal Institute of Philosophy Supplements* 39 (1995): 149–162.
- Dahan Dalmedico, Amy. "Chaos, Disorder, and Mixing: A New Fin-de-Siècle Image of Science". *Growing explanations: Historical Perspectives on Recent Science*, 2004, 67–94.

- Dahan Dalmedico, Amy. "Le Déterminisme de Pierre-Simon Laplace et le Déterminisme Aujourd'hui". In *Chaos et Déterminisme*, geredigeerd door A. Dahan Dalmedico, J.-L. Chabert en K. Chemla, 371–406. Parijs: Éditions du Seuil, 1992.
- Del Vecchio Junior, Jacintho. "Chance and Probability in Poincaré's Epistemology". *Philosophia Scientiæ* 20, no. 2 (2016): 177–196.
- Devaney, Robert L. *A First Course in Chaotic Dynamical Systems*. Reading: Addison-Wesley, 1992.
- Diacu, Florin en Philip Holmes. *Celestial Encounters: The Origins of Chaos and Stability*. New Jersey: Princeton University Press, 1996.
- Douady, Adrien. "Déterminisme et Indéterminisme dans un Modèle Mathématique". In *Chaos et Déterminisme*, geredigeerd door A. Dahan Dalmedico, J.-L. Chabert en K. Chemla, 11–18. Parijs: Éditions du Seuil, 1992.
- Earman, John. *A Primer on Determinism*. Dordrecht: D. Reidel Publishing Company, 1986.
- Hacking, Ian. "Nineteenth Century Cracks in the Concept of Determinism". *Journal of the History of Ideas* 44, no. 3 (1983): 455–475.
- Hadamard, Jacques. "Les Surfaces à Courbures Opposées et Leurs Lignes Géodésiques". *Journal de Mathématiques Pures et Appliquées* 4 (1898): 27–74.
- Hunt, G. M. K. "Determinism, Predictability and Chaos". *Analysis* 47, no. 3 (1987): 129–133.
- Janiak, Andrew. "Newton's Philosophy". In *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, Fall 2021, geredigeerd door Edward N. Zalta. Metaphysics Research Lab, Stanford University, 2021.
- Laplace, Pierre-Simon. *A Philosophical Essay on Probabilities*. Vertaald door Frederick Lincoln Emory en Frederick Wilson Truscott. New York: Dover Publications, 1951.

- Laplace, Pierre-Simon. *Essai Philosophique sur les Probabilités*. Paris: Courcier, 1814.
- Laskar, Jacques. "La Stabilité du Système Solaire". In *Chaos et Déterminisme*, geredigeerd door A. Dahan Dalmedico, J.-L. Chabert en K. Chemla, 170–212. Parijs: Éditions du Seuil, 1992.
- Lorenz, Edward N. "Deterministic Nonperiodic Flow". *Journal of Atmospheric Sciences* 20, no. 2 (1963): 130–148.
- Lorenz, Edward N. *The Essence of Chaos*. Seattle: University of Washington Press, 1995.
- Lüthy, Christoph H. en Carla Rita Palmerino. "Conceptual and Historical Reflections on Chance (and Related Concepts)". In *The Challenge of Chance: A Multidisciplinary Approach from Science and the Humanities*, geredigeerd door Klaas Landsman en Ellen van Wolde, 9–47. Cham: Springer International Publishing, 2016.
- Maxwell, James C. *Matter and Motion*. Cambridge: Cambridge University Press, 1888.
- Müller, Thomas en Tomasz Placek. "Defining Determinism". *The British Journal for the Philosophy of Science* 69, no. 1 (2018): 215–252.
- Parker, Matthew W. "Did Poincaré Really Discover Chaos?" *Studies in the History and Philosophy of Modern Physics* 29, no. 4 (1998): 575–588.
- Poincaré, Henri. *Dernières Pensées*. Parijs: Flammarion, 1917.
- Poincaré, Henri. *Les Méthodes Nouvelles de la Mécanique Céleste*. Vol. 3. Parijs: Gauthier-Villars et Fils, 1899.
- Poincaré, Henri. *Science et Méthode*. Parijs: Flammarion, 1908.
- Poincaré, Henri. "Sur le Problème des Trois Corps et les Équations de la Dynamique". *Acta Mathematica* 13 (1890): 1–270.
- Poincaré, Henri. *The Foundations of Science: Science and Hypothesis, The Value of Science, Science and Method*. Vertaald door George Bruce Halsted. The Science Press, 1913.

- Pomian, Krzysztof. "Le Déterminisme: Histoire d'une Problématique". In *La Querelle du Déterminisme: Philosophie de la Science d'aujourd'hui*, geredigeerd door Krzysztof Pomian. Parijs: Gallimard, 1990.
- Popper, Karl R. "Indeterminism in Quantum Physics and in Classical Physics". *The British Journal for the Philosophy of Science* 1, no. 3 (1950): 173–195.
- Popper, Karl R. *The Open Universe: An Argument for Indeterminism*. Londen: Hutchinson Publishing Group, 1982.
- Stone, Mark A. "Chaos, Prediction and Laplacean Determinism". *American Philosophical Quarterly* 26, no. 2 (1989): 123–131.
- Strogatz, Steven H. *Nonlinear Dynamics and Chaos: With Applications to Physics, Biology, Chemistry, and Engineering*. Boca Raton: CRC Press, 2018.
- van Strien, Marij. "On the Origins and Foundations of Laplacian Determinism". *Studies in History and Philosophy of Science* 45 (2014): 24–31.
- van Strien, Marij. "Was Physics Ever Deterministic? The Historical Basis of Determinism and the Image of Classical Physics". *The European Physical Journal H* 46, no. 8 (2021).
- Werndl, Charlotte. "What Are The New Implications of Chaos for Unpredictability?" *The British Journal for the Philosophy of Science* 60 (2009): 195–220.