

**Judea Pearl
en Dana Mackenzie**

HET BOEK WAAROM

**De nieuwe wetenschap
van oorzaak en gevolg**

Vertaald door Peter Abelsen en Robert Neugarten

MAVEN
PUBLISHING

Inhoud

Voorwoord van Bas Haring	7
Voorwoord van Judea Pearl	11
Inleiding: Woorden en cijfers	15
1. De Ladder van Causatie	41
2. Van boekaniers naar proefkonijnen: De oorsprong van causale inferentie	75
3. Van bewijs naar oorzaken: De eerwaarde Bayes ontmoet Sherlock Holmes	119
4. De dood van de dolende variabele	165
5. Een doorrookt debat verhelderd	201
6. Paradoxen in overvloed	225
7. De Interventieberg bedwongen	259
8. Contrafeitelijkheden: Werelden verkennen die hadden kunnen zijn	305
9. Mediatie: Op zoek naar een mechanisme	351
10. Big data, kunstmatige intelligentie en de grote vragen	405
<i>Woord van dank</i>	<i>431</i>
<i>Noten</i>	<i>435</i>
<i>Bibliografie</i>	<i>439</i>
<i>Register</i>	<i>469</i>
<i>Over de auteurs</i>	<i>480</i>

Voorwoord van Bas Haring

8 Toen ik hoorde dat Judea Pearl een boek geschreven had, een populairwetenschappelijk boek, vroeg ik me af om wie het ging. Toch niet de Judea Pearl van de zogenaamde Bayesiaanse netwerken? Die ik kende van mijn studie kunstmatige intelligentie – jaren geleden. Bayesiaanse netwerken behoorden tot het lastigste onderwerp van mijn studie indertijd, en ik stelde me voor dat de man achter die netwerken – Judea Pearl dus – een ernstige wiskundige zou zijn die zich nooit met zoiets alledaags als populaire wetenschap zou bezighouden. Maar het bleek, onverwacht, toch om dezelfde te gaan. En dat is meteen ook de eerste reden waarom ik dit een leuk en boeiend boek vind: ik hou ervan wanneer ernstige en goede wetenschappers hun best doen een groter publiek te bereiken. Ik zal in dit voorwoord nog wat redenen geven om dit een tof boek te vinden.

Reden twee is het onderwerp: causaliteit. Dat is een groot en lastig thema. Als ik een schakelaar indruk en ik zie dat het licht daarop aangaat, dan weet ik dat mijn drukken de oorzaak is van dat licht. Maar wat betekent ‘A is de oorzaak van B’ precies? Niet dat A en B altijd tegelijkertijd gebeuren, want dan zou het aangaan van het licht ook de oorzaak van het in-

drukken van de schakelaar kunnen zijn. Het is dermate lastig om goed te definiëren wat causaliteit precies is, dat er wetenschappers bestaan die het afdoen als een illusie. Een heel onbevredigend idee, want de notie van causaliteit is toch wel erg intuïtief. Zelfs mijn zoontje van drie weet dat hij dingen kan veroorzaken.

Pearl biedt een oplossing in dit boek. Centraal in die oplossing staat het dóen van iets. Spreadsheets vol data over schakelaars die aan- of uitstaan en lampen die branden of juist niet leren je niets over de oorzakelijke relatie tussen schakelaar en licht. Maar druk met je vinger op een lichtschakelaar en je weet hoe het zit. Dit is een belangrijk idee in het vakgebied van kunstmatige intelligentie en big data, waar mensen regelmatig nog denken dat je met voldoende data oorzakelijke verbanden kunt vinden. Onterecht dus, aldus Pearl.

Mijn derde reden dit een tof boek te vinden is het veelvuldige gebruik van illustratieve schemaatjes. Deze reden sluit vooral aan bij mijn persoonlijke interesses. Pearl is gewend om diagrammen te tekenen met letters en pijlen – die Bayesiaanse netwerken van zijn hand waren ook van zulke diagrammen – en mij helpen ze enorm. Ik vind het veel fijner om een pijl te zien van A naar B, plus een pijl van C naar diezelfde B; dan om te lezen ‘dat B zowel veroorzaakt kan worden door A als door C’. Ik hoop dat je begrijpt wat ik bedoel. Allicht had ik liever de pijlen hier voor je getekend. Waarschijnlijk was je het dan direct met me eens geweest. Niet iedere wetenschapper is fan van diagrammetjes, en vele doen het af als ‘slechts illustraties’. Ik ben het daar niet mee eens, en dit boek bevestigt mijn idee: diagrammen en andere tekeningetjes behoren, naast tekst en wiskundige formules, tot de kern van wetenschappelijke kennis.

Een laatste argument ten gunste van dit boek is dat van levensloop, en de wijsheid die daar hopelijk mee gepaard gaat. Ik ken de levensloop van Judea Pearl niet precies, maar ik stel me zo voor dat-ie een ambitieus wiskundige annex informaticus was die zich vol overgave stortte op de competitie die wetenschap is. Het is daar makkelijker te scoren op details dan op

HET BOEK WAAROM

grote ideeën, en dus stort het gros van de jonge wetenschappers zich op details. Gelukkig heeft Pearl zich aan die details ontworsteld en heeft hij tijd en aandacht genomen voor een groot en wezenlijk thema. Dat van de vraag ‘Waarom?’

Bas Haring

Voorwoord van Judea Pearl

12 Bijna twintig jaar geleden deed ik in het voorwoord van mijn boek *Causality* (2000) een uitspraak waarvan vrienden vonden dat ik die beter kon afzwakken. ‘Causaliteit heeft een ingrijpende transformatie ondergaan,’ schreef ik, ‘van een door raadselen omgeven concept in een wiskundig onderwerp met welbepaalde componenten en een goed gefundeerde logica. Paradoxen en tegenstrijdigheden zijn overwonnen, vage begrippen zijn expliciet gemaakt en we hebben eenduidige wiskundige modellen voor problemen met betrekking tot causale informatie, die voorheen als metafysisch of onhanteerbaar werden beschouwd. Kort gezegd: causaliteit is gemathematiseerd.’

Als ik deze passage nu herlees, heb ik het gevoel dat die toch niet helemaal correct was. Wat ik omschreef als een ‘transformatie’ bleek uiteindelijk een ‘revolutie’ die in tal van wetenschappen tot een nieuwe manier van denken leidde. Velen noemen het nu ‘de Causale Revolutie’, en de opwinding die erdoor ontstond in kringen van onderzoekers slaat intussen over op onderwijs en technologie. Volgens mij is de tijd rijp om het met een breder publiek te delen.

Dit boek heeft een drieledig oogmerk. Om te beginnen wil ik je

in niet-wiskundige taal bekend maken met de intellectuele inhoud van de Causale Revolutie en het effect daarvan op zowel ons leven als onze toekomst. Ten tweede wil ik je vertellen over de heroïsche zoektocht naar antwoorden, soms succesvol en soms niet, van wetenschappers die zich geconfronteerd zagen met fundamentele vragen omtrent oorzaak en gevolg.

En ten slotte wil ik beschrijven hoe de Causale Revolutie, verworteld als die is in het vakgebied van de kunstmatige intelligentie, tot de ontwikkeling zal leiden van robots die in onze moedertaal met ons communiceren – de taal van oorzaak en gevolg. Deze toekomstige generatie robots zou ons moeten kunnen uitleggen waarom bepaalde dingen gebeuren, hoe ze uit andere dingen voortvloeien en waarom de natuur zich op deze manier gedraagt en niet een andere. En ambitieuzer nog: zulke robots zouden ons moeten helpen onszelf te doorgronden, leren te begrijpen waarom onze geest werkt zoals hij doet, en hoe we rationeel moeten denken over oorzaak en gevolg, voldoening en spijt, verlangen en verantwoordelijkheid.

13

Als ik wiskundige vergelijkingen opstel, heb ik een welomlijnd idee van wie mijn lezers zijn. Schrijven voor het algemeen publiek bleek heel anders – een compleet nieuw avontuur voor me. Vreemd om te ervaren, maar tegelijk een van de meest verrijkende ervaringen die ik in educatieve zin heb gehad. De noodzaak om ideeën in jouw taal te gieten, te anticiperen op jouw achtergrond, jouw vragen en reacties, heeft mijn begrip van causaliteit meer verdiept dan alle vergelijkingen die ik voorafgaand aan dit boek heb opgesteld.

Ik zal je hier altijd dankbaar blijven. Ik hoop dat het resultaat je net zo zal aanspreken als mij.

Judea Pearl

Inleiding

Woorden en cijfers

16 *Iedere wetenschap die ooit bloeide, bloeide met zijn eigen symbolen.*
Augustus de Morgan (1864)

Dit boek vertelt het verhaal van een wetenschap die de wijze heeft veranderd waarop we feiten van fictie onderscheiden, maar die toch onder de radar van het algemeen publiek is gebleven. De effecten van deze nieuwe wetenschap doen zich al in enkele belangrijke opzichten gelden en hebben de potentie om voelbaar te worden op menig ander gebied – van de ontwikkeling van nieuwe medicijnen tot het uitstippelen van economisch beleid, van onderwijs en robotica tot wapenbeheersing en de opwarming van de aarde. Ondanks de verscheidenheid en ogenschijnlijke onverenigbaarheid van deze probleemgebieden, brengt deze wetenschap ze allemaal binnen één raamwerk, dat twintig jaar geleden nog vrijwel non-existent was.

De nieuwe wetenschap heeft nog geen chique naam: ik en veel van mijn collega's noemen haar simpelweg 'causale inferentie'. Uitgesproken hightech is ze ook niet. De technologie waarvan causale inferentie een afleiding wil zijn, is die welke in ons eigen hoofd

zetelt. Enkele tienduizenden jaren geleden begon het de mens te dagen dat sommige dingen andere dingen veroorzaakten, en dat manipulatie van die eerste dingen tot een verandering kon leiden van de laatsten. Geen andere diersoort snapt dit, althans niet in de mate waarin wij het snappen. Dit inzicht leidde tot georganiseerde groepen en vervolgens tot dorpen, en steden, en uiteindelijk tot de op wetenschap en techniek gebaseerde samenleving waarin wij tegenwoordig leven. En dat allemaal omdat we onszelf een eenvoudige vraag stelden: waarom?

Causale inferentie draait om het serieus nemen van deze vraag. Ze beschouwt het menselijk brein als het meest geavanceerde instrument voor het beoordelen en sturen van oorzaak en gevolg. Ons brein bevat een ontzagwekkende hoeveelheid causale kennis die we, na invoer van de relevante data, kunnen aanwenden om het antwoord te vinden op enkele van de meest urgente vragen van onze tijd. Ambitieuzer nog: als we daadwerkelijk de logica achter ons causale denken doorgronden, zouden we die in moderne computers kunnen doorvoeren om een ‘kunstmatige wetenschapper’ te creëren. De slimme robot zou dan fenomenen kunnen ontdekken die ons nog ontgaan, verklaringen kunnen vinden voor wetenschappelijke raadsels die ons te hooggegrepen zijn, en almaar meer causale kennis kunnen ontlenen aan de wereld om ons heen.

17

Maar voor we over zulke toekomstige ontwikkelingen kunnen speculeren, is het belangrijk de prestaties te leren kennen waartoe causale referentie al is gekomen. Laten we eerst nagaan hoe de nieuwe wetenschap het denken heeft veranderd van hen die werkzaam zijn in vrijwel alle dataverwerkende disciplines, en hoe ze op het punt staat ons leven te veranderen.

De nieuwe wetenschap richt zich op eenduidig lijkende vragen zoals deze:

- Hoe effectief is een bepaalde behandeling bij het voorkomen van een bepaalde ziekte?
- Vloeide onze omzetsijging voort uit die nieuwe belastingmaatregel, of was het een resultaat van onze reclamecampagne?
- In welke mate kunnen we de kosten van de gezondheids-

zorg toeschrijven aan de mate van overgewicht binnen de bevolking?

- Kunnen de werving-en-selectiedossiers van een bedrijf als bewijs worden gebruikt bij het aantonen van vrouwendiscriminatie?
- Ik speel met de gedachte mijn baan op te zeggen. Is dat slim?

Wat deze vragen gemeen hebben is dat ze betrokken zijn op oorzaak-gevolgverbanden, herkenbaar aan woorden als ‘voorkomen’, ‘voortvloeiën’, ‘resultaat’, ‘toeschrijven’ en zelfs aan ‘is dat slim?’ Woorden van het soort dat alomtegenwoordig is in onze omgangstaal, en onze samenleving verlangt onophoudelijk antwoorden op zulke vragen. En toch boden wetenschappers ons tot voor zeer kort geen hulpmiddelen om die vragen goed te stellen, laat staan er een goed antwoord op te krijgen.

18 Veruit de grootste betekenis van causale referentie voor de mensheid, is dat ze een einde heeft gemaakt aan deze wetenschappelijke onvolkomenheid. De nieuwe wetenschap heeft een eenvoudige wiskundige taal voortgebracht, waarmee zowel bekende causale verbanden kunnen worden benoemd als die welke vooralsnog buiten ons zicht vallen. De mogelijkheid om deze informatie in mathematische vorm te gieten heeft een schat aan degelijke methoden opgeleverd om onze kennis met data te combineren en de antwoorden te vinden op causale vragen als de bovenstaande.

Het was een voorrecht om in de voorbije vijftientig jaar deel uit te maken van deze ontwikkeling. Ik heb de vorderingen kunnen gadeslaan in researchlaboratoria en de cubicles van studenten, en de doorbraken horen resoneren op specialistische congressen, ver buiten de schijnwerpers van de wetenschapsjournalistiek. Maar nu we zijn aanbeland in het tijdperk van ‘sterke KI’ en hoge verwachtingen koesteren rondom big data en *deep learning*, lijkt het me tijd om het bredere lezerspubliek te vertellen over de avontuurlijke paden die de nieuwe wetenschap is ingeslagen, over de impact die ze zal hebben op de informatiewetenschap en over de vele manieren waarop ze in de eenentwintigste eeuw ons leven zal veranderen.