

Een goed model?

D. Dieks

Instituut voor Geschiedenis en Grondslagen van de Natuurwetenschappen
Universiteit Utrecht

Summary

The main topic of this brief essay is the relation between physical theory and physical reality, and the applicability, in this context, of the notion of "model". We discuss two different meanings of the term "model": first, analogies and, second, formal models in the sense of model theory. Physical theories can be characterised by the structure of their formal models; if the theory is true, physical reality itself constitutes a formal model of the theory. However, there are several reasons to think that the notions of truth and model in this sense are not of paramount importance in physics. The underdetermination of theories by empirical data, and the role played by social factors in the development of theories, make it natural to think of physical theories as models of the first kind.

1. Inleiding

Het woord "model" heeft meer dan één betekenis. Dat geldt voor de omgangstaal, maar ook voor hoe in de filosofie van de natuurwetenschappen over modellen wordt gesproken.

In het dagelijks taalgebruik wordt met een model vaak een nabootsing bedoeld: een gipsen model van de Sacré Coeur, of een plastic vliegtuig uit een modelbouwpakket. Eén van de betekenissen van "model" in de filosofie van de natuurwetenschappen, en in de natuurwetenschappen zelf, ligt hier dichtbij. Het gaat dan om een constructie, op papier of werkelijk gebouwd, die in bepaalde opzichten overeenkomt met het gemodelleerde object maar daar op andere punten van afwijkt. Denk bijvoorbeeld aan een schaalmodel van een vliegtuig dat in een windtunnel wordt getest, of aan een met kunststof bollen en ijzerdraad vervaardigd model van een kristal; of aan een stelsel van gekoppelde differentiaalvergelijkingen waarvan de oplossing het populatieverloop van bosuilen en veldmuizen beoogt weer te geven.

Dit soort modellen haalt een belangrijke aspect van een verschijnsel naar voren en maakt het toegankelijk voor onderzoek, zonder de pretentie een volledige beschrijving te leveren. De kwaliteit van het model wordt bepaald door de nauwkeurigheid waarmee de relevante eigenschappen van het origineel worden gereproduceerd. Uit deze omschrijving is meteen duidelijk dat het aanwijzen van een te modelleren verschijnsel niet voldoende is om vast te leggen hoe een goed model er uit moet zien. Eerst moet immers worden aangegeven wat de relevante aspecten zijn die in het model moeten worden gereproduceerd; en met welke nauwkeurigheid dit moet gebeuren. Dit zijn criteria die met de onderzoeker en de doelen die deze zich stelt hebben te maken. Afhankelijk van de onderzoeksvraag zijn dan ook totaal verschillende modellen van hetzelfde object of verschijnsel mogelijk: een plattgrond als het om de afmetingen op de vloer van een gebouw gaat, een

maquette als de ruimtelijke afmetingen interessant zijn en een mathematisch model als het gaat om het gedrag bij een aardbeving.

Gegeven zo'n specificatie van het relevante aspect en de gevraagde nauwkeurigheid is het wél een objectieve kwestie of het model goed is: dat hangt er dan alleen nog van af of de eigenschappen van het model en die van het origineel inderdaad binnen de gestelde grenzen overeenkomen.

Een model in deze zin is dus een menselijke constructie. Hoe het er uitziet hangt af van onze voorkeuren, interesses en doelen. Dit zijn geen factoren die in het gemodelleerde verschijnsel zelf zijn verankerd. Maar als het model en zijn doelen eenmaal gespecificeerd is, is de kwaliteit ervan een objectieve zaak geworden.

2. Formele modellen.

In de wetenschapsfilosofie en in de logica wordt het woord "model" ook op een andere, technische, manier gebruikt. Er is zelfs een apart vak, verwant aan de formele logica, dat "modeltheorie" heet. Hierin houdt men zich bezig met de relaties tussen aan de ene kant theorieën, geformuleerd in een wiskundige taal, en aan de andere kant verzamelingen van objecten met hun onderlinge relaties die aan die theorieën voldoen.

Een voorbeeld is de theorie met de volgende axioma's (Hofstadter, 1979;, ch. VIII):

$$A1. \quad \forall a: \sim Sa = 0$$

$$A2. \quad \forall a: (a + 0) = a$$

$$A3. \quad \forall a, \forall b: (a + Sb) = S(a + b)$$

$$A4. \quad \forall a: (a \cdot 0) = 0$$

$$A5. \quad \forall a, \forall b: (a \cdot Sb) = ((a \cdot b) + a)$$

Elk van deze axioma's is een rijtje van symbolen, en de theorie die op de vijf axioma's is gebaseerd is dus niets anders dan een verzameling van zulke rijtjes van symbolen die door toepassing van vaste regels (logische deductie) uit de axioma's volgen. Dit is het syntactische gezichtspunt, waarin een theorie wordt opgevat als een spel waarin volgens strikte, van tevoren vastgelegde, regels wordt gemanipuleerd met abstracte tekens. Het is belangrijk dat in dit syntactische spel geen andere betekenis wordt toegekend aan de symbolen dan hun rol in de spelregels. Er wordt dus niet verondersteld dat de symbolen ergens voor staan, dat ze *verwijzen* naar iets buiten de wereld van het spel.

Een theorie in de natuurwetenschappen heeft natuurlijk wél de bedoeling ergens over te gaan; en zelfs in de wiskunde en logica is men in het algemeen niet tevreden met het zuiver syntactische standpunt. Dan wordt het zinvol om te vragen wat de symbolen van de theorie aanduiden; naar welke dingen de symbolen verwijzen, of van welke dingen ze de *naam* zijn.

Een antwoord in het geval van onze vijf axioma's ligt voor de hand. Dat komt doordat sommige van de gebruikte symbolen ons zo vertrouwd zijn als "verwijzers", dat het moeilijk is die betekenis buiten beschouwing te laten. Zo staat "+" vanzelfsprekend voor "optellen", "." voor vermenigvuldigen, en "0" voor nul. Met deze hints wordt het bijna onontkoombaar de axioma's te interpreteren als uitspraken over de niet-negatieve gehele getallen ("∀" betekent dan "voor alle", "∼" betekent "niet", "Sa" betekent "de opvolger van getal a", d.i. het eerste grotere gehele getal). Hiermee verlaten we het syntactische

gezichtspunt en begeven ons op het terrein van de *semantiek*. In de semantiek gaat het om de betekenis die symbolen krijgen wanneer ze iets gaan aanduiden; in dit geval dus de natuurlijke getallen (plus nul) en hun rekenkundige relaties.

Een *model* van een formele theorie is nu een interpretatie van de symbolen (die tot stand komt door aan te geven waarnaar de symbolen verwijzen) die zodanig is dat de axioma's en daaruit afgeleide stellingen van de theorie ware uitspraken worden over het domein waar de interpretatie betrekking op heeft. In het bovenstaande voorbeeld vormen de niet-negatieve gehele getallen en hun optel- en vermenigvuldigingsrelaties een model voor de axioma's A1 t/m A5, want elk van die axioma's is waar indien gelezen als een uitspraak over de verzameling van die getallen (bijv. A1: er is geen niet-negatief geheel getal kleiner dan nul).

Waarin verschillen deze formele modellen nu van de modellen uit de vorige paragraaf? In het voorbeeldgeval is te zien dat een soort van omkering heeft plaatsgevonden: in de vorige paragraaf begonnen we met een concreet origineel, waarvan we bepaalde aspecten, binnen zekere nauwkeurigheidsgrenzen, representeerden met het model. Nu starten we met een linguïstisch, symbolisch, stelsel en gebruiken we een model om er iets concreets mee te verbinden. De relaties die in de theorie worden beschreven corresponderen per definitie perfect met de relaties die in dit laatste model bestaan.

Het zou wel zo kunnen zijn dat niet alles wat in het formele model aanwezig is correspondeert met uitspraken in de theorie. Zo kunnen we ons voorstellen dat over de niet-negatieve gehele getallen meer waarheden bestaan dan wat volgt uit de axioma's van de theorie. Hadden we dus in het geval van de modellen uit de vorige paragraaf dat een model slechts een onvolledige representatie hoeft te geven van een origineel, nu krijgen we te maken met de mogelijkheid dat een theorie haar eigen modellen slechts onvolledig beschrijft. Inderdaad blijkt uit de zogenaamde onvolledigheidsstelling van Gödel dat interessante formele theorieën (dat wil zeggen theorieën die minstens in staat zijn het rekenen met gehele getallen te formaliseren) altijd modellen toelaten die onderling qua structuur fundamenteel verschillen. Uitspraken die waar zijn in het ene model zijn dat dan niet in het andere.

3. Model, theorie en werkelijkheid in de natuurkunde.

Gewapend met deze informatie over de verschillende betekenissen van "model" gaan we ons hoofdthema beschouwen: wat is de relatie tussen een fysische theorie en de werkelijkheid? Laten we om te beginnen de hypothetische situatie bekijken waarin we een theorie bezitten die de fysische wereld exact beschrijft zoals zij werkelijk is. Dat zou betekenen dat de objecten en hun onderlinge relaties in de fysische werkelijkheid precies zo zijn dat alle binnen de theorie afleidbare zinnen ware uitspraken worden als ze worden geïnterpreteerd in termen van die objecten en hun relaties. Met andere woorden, *de wereld is een (formeel) model van de theorie*, en de theorie is waar. Dit lijkt een ideale situatie, waarnaar de natuurkunde zou moeten streven. Of zijn we nu misschien te simplistisch bezig met de relatie tussen theorie en werkelijkheid?

Laten we voordat we op die vraag ingaan een verband leggen tussen het formele modelbegrip waar we nu mee bezig zijn en het meer intuïtieve

modelbegrip uit de eerste paragraaf. Het zojuist geschetste geval, waarin de werkelijkheid een formeel model vormt van de theorie, is vanuit praktisch oogpunt natuurlijk onrealistisch. Zelfs als die situatie zich in principe ooit zou kunnen voordoen, is het in de praktijk realistischer te denken aan het geval waarin de werkelijkheid niet precies is zoals de theorie zegt. Dan bestaan natuurlijk toch formele, exact kloppende modellen van de theorie: namelijk gedachtenconstructies (die bijvoorbeeld gebruik maken van wiskundige objecten met passend gekozen definities) die zich exact volgens de regels van de theorie gedragen. De vraag kan dan worden gesteld in hoeverre die formele theoriemodellen een model in intuïtieve zin van de werkelijkheid opleveren. Anders gezegd: geven de formele theorie modellen met voldoende nauwkeurigheid voor ons relevante aspecten van de fysische werkelijkheid weer? Deze vergelijking tussen formele theoriemodellen en fysische werkelijkheid is de achtergrond waartegen de veelgehoorde uitspraak "een theorie geeft slechts een model van de werkelijkheid" moet worden geplaatst. De theorie wordt dan gekarakteriseerd door een formeel model ervan, en dat formele model wordt vervolgens als een gedeeltelijke representatie, met een beperkte nauwkeurigheid, van de werkelijkheid opgevat.

Nu weer terug naar de situatie van zo-even, waarin theoriemodel en fysische werkelijkheid volkomen samenvallen. Is het bereiken van die situatie het uiteindelijke doel van de natuurkunde? Dat wil zeggen, gaat het er in de natuurkunde om steeds betere modellen (in onze eerste zin) van de wereld te ontwikkelen om tenslotte tot een perfect passend formeel model te komen? We stuiten hier op een probleem dat er bij de beoordeling van de kwaliteit van de modellen uit de eerste paragraaf niet was. Hoe moeten we namelijk de *totale fysische werkelijkheid* met een theorie en het formele model daarvan vergelijken? Als we een schaalmodel van een vliegtuig met het vliegtuig zelf vergelijken is duidelijk genoeg wat we moeten doen; we hebben zowel toegang tot het vliegtuig als tot het model en kunnen de twee naast elkaar leggen. Maar wanneer we een theorie uit de moderne fysica, en de bijbehorende formele modellen, op soortgelijke wijze naast de werkelijkheid willen leggen krijgen we te maken met de moeilijkheid dat een groot gedeelte van die werkelijkheid niet direct voor ons toegankelijk is. We kunnen de (sub)microscopische werkelijkheid niet direct waarnemen en gebruiken theorieën om structuur aan dit gedeelte van de fysische wereld toe te kennen. Stel bijvoorbeeld dat de theorie die we op haar waarheid willen beoordelen spreekt over quarks en andere elementaire deeltjes. We zouden dan een model van de theorie, waarin die deeltjes dus voorkomen, moeten vergelijken met de echte wereld en zien of er overeenstemming is. Maar we kunnen niet door simpelweg naar de wereld te kijken vaststellen of er inderdaad zulke deeltjes zijn, en of die inderdaad de relaties tot elkaar hebben zoals de theorie het zegt. We hebben slechts empirische toegang tot dat gedeelte van de wereld waarin de objecten en processen groot genoeg zijn, of energierijk genoeg, om door onze zintuigen te kunnen worden onderscheiden. De rest construeren we via een theorie: we postuleren niet-zichtbare objecten en processen ter verklaring van datgene wat we wel kunnen waarnemen.

We komen zo in een vicieuze cirkel terecht. Aan de ene kant willen we onze beste en meest recente theorieën, en de formele modellen die daarbij horen, toetsen aan de structuur van de wereld zelf; aan de andere kant komt

de beste informatie over de structuur van de wereld uit onze beste en meest recente theorieën. Het lijkt er op dat we daarom niet meer kunnen doen dan theorieën met elkaar en met waarnemingsresultaten te vergelijken. Het vergelijken van theorie en gehele fysische wereld lijkt onmogelijk.

4. Het *realistische* antwoord.

Eén mogelijke reactie is dat de zojuist gesignaleerde cirkel eerder een praktisch dan een principieel probleem oplevert. De gedachte is dan dat de wereld uit zichzelf nu eenmaal een objectieve structuur *heeft*, helemaal onafhankelijk ervan of wij daar toegang tot hebben of niet. Dit is het standpunt van het "realisme". De vraag of een theoretisch model overeenkomt met de wereld zoals die echt is heeft volgens dit standpunt een objectief antwoord. Alleen kunnen wij dat antwoord niet geven door ons louter op waarnemingen te beroepen.

De vervolgvraag is dan natuurlijk hoe het antwoord wél gegeven zou kunnen worden. De meeste realisten stellen zich op het standpunt dat we daartoe een beroep moeten doen op niet-empirische argumenten. Zo wordt vaak het idee verdedigd dat overwegingen van eenvoud, schoonheid of mathematische elegantie de doorslag kunnen geven. Een theoretisch model dat simpel is en esthetische mathematische kwaliteiten heeft, zou volgens deze gedachte een grotere kans hebben de wereld juist te representeren dan een model dat onhandig in elkaar zit.

Deze strategie lost ons probleem echter niet op, maar verplaatst het slechts. Want nu kunnen we gaan vragen naar de rechtvaardiging van de gedachte dat mooie modellen een grotere kans hebben met de werkelijkheid overeen te stemmen dan lelijke. Zo'n rechtvaardiging zou gegeven kunnen worden als we konden constateren dat mooie modellen in het verleden inderdaad dichter bij de waarheid zaten dan lelijke. Maar nu duikt de oorspronkelijke moeilijkheid weer op: we kunnen onze theoretische modellen niet naast de wereld leggen en van punt tot punt vaststellen of ze kloppen. We kunnen dus ook helemaal niet constateren dat mooie theorieën de wereld in het verleden beter hebben gerepresenteerd dan lelijke.

Wat we natuurlijk wel kunnen doen is onze theorieën vergelijken met de resultaten van experimenten. Het is vanzelfsprekend dat bij die vergelijking theorieën die niet met de waarneming kloppen moeten afvallen. Echter, hoe we moeten omgaan met theorieën die even goed met de empirische feiten overstemmen maar verschillende structuren aan de wereld als geheel toekennen, blijft in die vergelijking onbeantwoord.

5. Het *empiristische* antwoord.

Een radicaal andere reactie is te stellen dat het helemaal niet de taak van de natuurwetenschap is de wereld als geheel te beschrijven. Volgens deze visie, recent verdedigd door de Amerikaanse wetenschapsfilosoof van Nederlandse afkomst Van Fraassen (zie Van Fraassen, 1980), moet de natuurkundige niet verder willen gaan dan het opstellen van theorieën, en bijbehorende formele modellen, waar de waarneembare verschijnselen in passen. Het gaat erom dat er modellen worden geconstrueerd die "empirisch adequaat" zijn, zoals Van Fraassen het noemt. De wereld als geheel, ook in haar niet voor de zintuigen toegankelijke microstructuur, zou dan weliswaar *kunnen* zijn zoals het model zegt, maar zij zou er ook van kunnen afwijken. Welke van die twee

mogelijkheden feitelijk is gerealiseerd is geen natuurwetenschappelijke vraag, vindt Van Fraassen; het is een onderwerp voor speculatie en metafysische bespiegeling. Deze inperking van de pretenties van de natuurwetenschap past in de empiristische traditie van Ernst Mach (1838-1916) en, in de twintigste eeuw, van de Wiener Kreis. Als we deze lijn volgen moeten we klaarblijkelijk het idee dat het het doel van de natuurkunde is de fysische werkelijkheid in al haar details te beschrijven loslaten. De formele theorie-modellen die de theoretische fysica ons levert hebben dan blijkbaar een beperkte waarde, te vergelijken met de modellen in de eerste door ons onderscheiden betekenis.

Deze laatste gedachte is verder uitgewerkt door de Amerikaanse wetenschapsfilosofe Nancy Cartwright (zie Cartwright, 1983). Zij verweert zich tegen de traditionele zienswijze volgens welke het de taak van de fysica is allesomvattende theorieën op te stellen, waarin zoveel mogelijk verschijnselen onder één noemer worden gebracht en uiteindelijk exact worden beschreven. Volgens haar toont de praktijk van de fysica aan dat de natuurkundige zich feitelijk slechts ten doel stelt voor afzonderlijke, concrete, situaties modellen in de zin van onze eerste paragraaf - dus een soort van analogieën met beperkte nauwkeurigheid- te ontwikkelen die praktisch nuttig zijn. De algemene theorieën uit de leerboeken (Maxwelltheorie, quantummechanica, ed.) dienen in deze visie als algemene schema's, als algemene bouwvoorschriften, voor de constructie van zulke modellen. Maar in iedere concrete situatie moet er van alles worden toegevoegd, en vaak ook gewijzigd, aan die algemene schema's. Fysische theorieën mogen daarom niet worden opgevat als pogingen de wereld te beschrijven zoals zij is. De formele modellen van onze algemene theorieën zijn pure gedachtenconstructies, die zelfs niet de taak hebben weer te geven hoe de wereld zou kunnen zijn. De natuurwetenschap moet worden beoordeeld op grond van de kwaliteit van de afzonderlijke concrete modellen, die met elkaar een lappendeken vormen waarin geen vast patroon zit.

6. Het constructivisme.

Het centrale probleem in de discussie over de relatie tussen theorie en bijbehorend formeel model enerzijds en werkelijkheid anderzijds zit dus in de onmogelijkheid empirisch vast te stellen of een door een theorie gegenereerd model op alle punten (ook wat onwaarneembare deeltjes en processen betreft) overeenstemt met de werkelijkheid. Ondanks deze moeilijkheid zien we dat in de praktijk één theorie, en één daarbij horend beeld (model), het gewoonlijk wint. Ook al bestaan er in principe heel veel andere theorieën die op empirisch vlak even goed presteren, één theorie wordt tenslotte in de collegezalen gedoceed en komt in de leerboeken terecht. En al zeggen Van Fraassen en Cartwright dat het niet de taak van de natuurwetenschap kan zijn een juist beeld van de wereld als geheel te ontwerpen, in de praktijk wordt doorgaans de geaccepteerde theorie wel degelijk behandeld als misschien niet de uiteindelijke waarheid, maar dan toch als een heel goede benadering van de structuur van de wereld als geheel.

Die overwinning van één theorie, en het bijbehorende model, kan niet worden gezien als een door logica en empirische gegevens afgedwongen uitkomst. Hoe moet er dan tegenaan worden gekeken? Volgens *sociaal constructivisten* ligt het antwoord besloten in de vaststelling dat wetenschap

een menselijke activiteit is. Natuurwetenschappelijke onderzoekers zijn, net als mensen met andere bezigheden, verwickeld in sociale processen waarin ze proberen anderen te overtuigen. Deze processen kunnen worden gezien als een soort onderhandelingen, waarin naast logica en discussie over wat de feiten zijn ook prestige, macht, de mate waarin over technische mogelijkheden beschikt kan worden, en soortgelijke factoren, een belangrijke rol spelen. Het zijn ingewikkelde processen van geven en nemen, waaruit tenslotte als eindresultaat consensus over het algemeen geaccepteerde beeld oprijst. De daarbij behorende waarheid is dan dus niet door de fysische werkelijkheid aan de onderzoekers opgelegd, maar is door de onderzoekers zelf in een sociaal proces geconstrueerd. Natuurwetenschappelijke onderzoekers leggen een structuur op aan de werkelijkheid, en niet andersom.

Het sociaal constructivisme is op dit moment onderwerp van felle debatten (de "Science Wars"). Sommige aanhangers van de beweging zijn extreem in hun claims, en suggereren dat er geen enkele rol is weggelegd voor een objectieve fysische realiteit bij de constructie van natuurkundige theorieën. Zij stellen dat zelfs waarneembare feiten en de beoordeling of een experimentele opstelling al dan niet goed werkt een kwestie van sociale constructie is¹. Dat standpunt is moeilijk houdbaar.

De gematigder zienswijze dat natuurkundigen ook maar mensen zijn, die zo goed mogelijk omgaan met het beperkte feitenmateriaal dat hun ter beschikking staat, en daaruit in onderlinge interactie theoretische modellen distilleren, lijkt echter heel redelijk². Volgens dit standpunt is de uitkomst van ieder onderzoek, ook het meest volmaakte, "een model" in beide door ons onderscheiden betekenissen. Het is een formeel model in de zin dat het een structuur, een beeld, is dat past bij een theorie en die theorie karakteriseert. Maar die theorie hebben we zelf geconstrueerd, en in het proces van theorieontwikkeling hanteren we uit onszelf voortkomende normen en doelen. De geaccepteerde theorie zal zo goed mogelijk (volgens de door de wetenschappelijke gemeenschap aanvaarde normen) bij de waarneembare verschijnselen moeten passen; maar de totale structuur van de theorie wordt niet door die verschijnselen vastgelegd. Wijzelf als opstellers van de theorie, met onze verschillende achtergronden, voorkeuren en belangen spelen een belangrijke rol. Daarom moet het resultaat van natuurwetenschappelijk onderzoek ook gezien worden als een model in onze eerste zin. Het is een door mensen geconstrueerd beeld dat niet op alle punten betrouwbaar is maar desalniettemin onze beste toegang tot de fysische realiteit.

Noten

1. Zie voor voorbeelden van vergaande claims in het sociaal constructivisme, en een aanval daarop die uitmondde in de "Science Wars", (Gross, P. & Levitt, N.1994) "*Higher Superstition*", John Hopkins, Baltimore.
2. Een gematigde positie wordt verdedigd door Kitcher, P. (1998) "A Plea for Science Studies", In: N. Koertge (ed.), *A House Built on Sand*, Oxford University Press, Oxford. Zie deze bundel ook voor andere artikelen waarin extreem sociaal-constructivistische stellingen worden bekritiseerd, met verwijzing naar de oorspronkelijke literatuur.

Literatuur

Hofstadter, D.R.(1979). *Gödel, Escher, Bach: An Eternal Golden Braid*, Basic Books Inc., New York,
Fraassen, B.C van..(1980). *The Scientific Image*. Clarendon Press, Oxford.
Cartwright, N. (1983). *How the Laws of Physics Lie*. Clarendon Press. Oxford.