



Einstein se relativiteitsteorie: Op die kruispunt van *aprioriese elemente en empiriese ervaring*

Author:

 Danie F.M. Strauss¹
Affiliation:
¹Department of Philosophy,
University of the Freestate,
South Africa

Correspondence to:

Danie Strauss

Email:

dfms@cknet.co.za

Postal address:

 PO Box 339, Bloemfontein
9300, South Africa

Dates:

Received: 08 Feb. 2012

Accepted: 15 Nov. 2012

Published: 05 Mar. 2013

How to cite this article:

 Strauss, D.F.M.,
2013, 'Einstein se
relativiteitsteorie: Op die
kruispunt van *aprioriese
elemente en empiriese
ervaring*', *Suid-Afrikaanse
Tydskrif vir Natuurwetenskap
en Tegnologie* 32(1), Art.
#329, 8 pages. [http://dx.doi.
org/10.4102/satnt.v32i1.329](http://dx.doi.org/10.4102/satnt.v32i1.329)
Copyright:

 © 2013. The Authors.
Licensee: AOSIS
OpenJournals. This work
is licensed under the
Creative Commons
Attribution License.

Waardering vir die status van natuurwetenskaplike kennis volg 'n merkwaardige wentelgang deur die geskiedenis van die filosofie en die verskillende vakwetenskappe. Te midde van ekstreme uiterstes moes die benadering van Einstein 'n rigting vind wat beide 'n eensydige *apriorisme* en 'n oordrewe *positivisme* afwys. Die historiese agtergrond van die aprioriteitsprobleem – dit wat ons ervaring voorafgaan – is vlugtig nagespeur tot by die Griekse wortels daarvan. Omdat Einstein ruimte gelaat het vir skeppende denke, het dit hom weliswaar in staat gestel om van die *universaliteit* van sleutelaspekte van die natuur gebruik te maak, in die besonder gefokus op die uniekheid en die samehang van die kinematiese en fisiese aspekte van die werklikheid. Enersyds het die onderskeid tussen hierdie twee aspekte 'n vertrekpunt verskaf om kritiek te lewer op die *meganistiese* inslag van die klassieke fisika (toegespeits om die onderskeid te tref tussen *omkeerbaarheid* en *onomkeerbaarheid*), en andersyds het die *ontiese* universaliteit van hierdie aspekte hom gehelp om hierdie onties aprioriese gegewens tot hul reg te laat kom, ook ten opsigte van die eise wat die *ervaring* stel (die relatiewe reg van die positivistiese klem op die *eksperimentele toetsing* van tipewette). Hieruit volg dat Einstein se siening met reg as 'n *transendentale empiriese* benadering getipeer kan word. Dit belig ook die onderskeid tussen *modale wette* en *tipewette*, asook die skynbaar misterieuse toepaslikheid van die wiskunde op natuurverskynsels. Laastens word aangevoer dat die onlangse beweringe oor die snelheid van die neutrino wat vinniger as dié van lig sou wees, nié Einstein se spesiale relativiteitsteorie (sal) weerlê nie.

Einstein's theory of relativity: At the intersection of apriori elements and empirical experience.

Appreciation for the status of scientific knowledge followed a remarkably winding path throughout the history of philosophy and of the various specialised sciences. Einstein had to find direction, avoiding the extremes of a one-sided *apriorism* and an excessive *positivism*. The historical background of the problem of what is apriori – that which precedes our experience – is briefly traced back to its Greek roots. Because Einstein did leave room for creative thinking, it empowered him to explore the universality of key aspects of nature, focusing particularly on the uniqueness and coherence of the kinematic and physical aspects of reality. Distinguishing between these aspects provides, on the one hand, a point of departure for criticising the mechanistic inclination of classical physics (directed at the distinction between *reversibility* and *irreversibility*), and on the other hand, the ontic universality of these aspects. This helps us to do justice to the ontic universality of these aspects in respect to the demands of experience (the relative justification of the positivistic emphasis on experimental testing of type laws). So Einstein's approach may be classified as a transcendental-empirical method of investigation. It also highlights the distinction between modal laws and type laws, as well as the apparently mysterious applicability of mathematics to natural phenomena. Finally it is argued that the recent reports in the news media regarding the speed of the neutrino, allegedly faster than that of light, will not invalidate Einstein's theory of relativity.

Breëre konteks

Die geskiedenis van beide die filosofie en die verskeidenheid vakwetenskappe word deurlopend gekonfronteer met die probleemvraag rakende die verhouding tussen denke en ervaring. Aanvanklik was Albert Einstein onder die invloed van die positivisme van Ernst Mach. Die kernelement van hierdie positivisme is geleë in die vertrouwe op sintuiglike waarneming – op ervaring of op die sogenaamde empiriese verskynsels (sintuiglike waarnemings of *sense data*). Op sy beurt gryp hierdie tradisie terug na die empiristiese filosofie van die sewentiende en agtiende eeue, by name Locke, Berkeley en Hume. In sy *Essay Concerning Human Understanding* (1690) aanvaar Locke weliswaar nog intuïtief evidente kennis, wat nie uit die ervaring kom nie, in die wiskunde en etiek. Saam met die etiek verskaf die wiskunde 'pre-ervaringskennis' (d.i. aprioriese kennis) aan ons, want ons kan nooit 'n perfekte driehoek of 'n moreel perfekte

Read online:

 Scan this QR
code with your
smart phone or
mobile device
to read online.



mens sintuiglik waarneem nie.¹ Beide Berkeley en Hume het egter meer konsekwent empiristies gedink as Locke. Berkeley is bekend vir sy tese dat blote bestaan gelyk gestel moet word aan die waarneembaarheid van dinge – om te bestaan is om waargeneem te word (*esse is percipi* – vgl. Berkeley 1710:I, 3 & 6; 1969:66–67). Hume verdedig 'n siening wat presies teëgestel is aan wat Descartes geleer het. Waar Descartes nog oortuig was dat waarneming niks anders as denke is nie,² het Hume daarteenoor in sy *A Treatise of Human Nature* geleer: 'To hate, to love, to think, to feel, to see; all this is nothing but to perceive' [*Om te haat, te dink, te voel en te sien; dit is alles niks anders nie as om waar te neem.*] (Hume 1739:1, 2, 6; 1962:113).

Hierdie empiristiese filosowe het dus in reaksie gekom teen die aanvaarding van aprioriese kennis, dit wil sê kennis waaroor die mens sou beskik voorafgaande aan enige (sintuiglike) ervaring (laasgenoemde heet aposterioriese kennis).

Die spanning wat sedert die Renaissance na vore getree het tussen aprioriese kennis en aposterioriese ervaring het duideliker geword namate die Griekse en Middeleeuse intellektuele erfenis teenoor 'n toenemend wetenskaplike ondersoek van die natuur te staan gekom het. Ons kan hier dink aan Leonardo da Vinci (1452–1519) wat die ontdekking van die bloedsomloop vooruitgehoop het, asook aan Galilei se wiskundig meganiese ontleding van fisiese verskynsels.³ In 1600 het Gilbert opgemerk dat die aarde 'n magneet is. Al eerder het Oresme die ontdekking van die analitiese meetkunde deur Descartes en Fermat geantisipeer. Francis Bacon (1561–1626) was oortuig dat die eksperimentele wetenskappe die beheersing van die natuur deur die mensdom sou bevorder.

Die agtergrondprentjie word weliswaar eers voltooi wanneer ons hierdie intellektuele erfenis verbind aan die transformasie van Plato (*Phaedo* 79d; 1960:131). se leer oor ewige, bo-tydelike ideë tot ideë in God se Gees en uiteindelik tot aangebore (aprioriese) ideë [*idea innata*] in die menslike gees (Descartes en gedeeltelik Locke).

Die ervaring van dinge en hul eienskappe

Die hoofokus in die Griekse en Middeleeuse filosofieë was op die aard van konkrete dinge gerig. Te midde van die

1. Locke meen dat waarhede soos dat wit nie swart is nie, dat 'n sirkel nie 'n driehoek is nie en dat drie meer as twee is, kennis daarstel wat intuitief seker is (soortgelyk aan wat Descartes voorgestaan het), (Locke 1690: IV, 1, 9; 1964:325–326). Moraliteit deel in hierdie sekerheid, want die stelling: Waar daar nie eiendom is nie, is daar nie onreg nie, is net so seker as die stelling dat 'n driehoek drie hoeke het wat gelyk is aan twee regte hoeke – Ek is tot dieselfde mate in staat om seker te wees van die waarheid van hierdie stelling as van enigeen in wiskunde (Locke 1690: IV, 2, 18; 1964:338–339).

2. 'At all events it is certain that I seem to see light, hear a noise, and feel heat; this cannot be false, and this is what in me is properly called perceiving (*sentire*), which is nothing else than thinking' [*In elk geval is dit seker dat ek blykbaar lig sien, 'n geluid hoor en hitte voel; dit kan nie vals wees nie; en dit is in my en word met reg waarneming genoem, wat niks anders as dink is nie.*] (Meditation II, Descartes 1965:90, [outeur se eie vertaling]).

3. Hucklenbroich wys daarop dat Galileo in getal, ruimte en beweging die primêre kwaliteite van materie gesien het: telbaarheid, vorm, grootte, lengte en beweeglikheid (Hucklenbroich 1980:291).

verganklikheid (veranderlikheid) van dinge wou Plato 'n ankerpunt vind in die vermeende statiese, ewige essensie (wese) van dinge. Hierdie wese sou bloot verstandelik beskou kon word omdat dit behoort tot die statiese sfeer van die (bo-sintuiglike) denkbare, in teenstelling met die sintuiglike wêreld waar wording en verandering voortdurend 'n rol speel.

In sy dialoog *Phaedo* onderskei Plato alles wat onsigbaar (konstant) en alleen verstandelik te bedink is, van alles wat sigbaar (en veranderlik) is en alleen sintuiglik waargeneem kan word. Sou die menslike siel sonder enige bemiddeling van die liggaam ondersoek instel, is dit gerig op die wêreld van die suiwere en altyd bestaande, van die ontsterflike en altyd eenderse, van die konstante en gelykaardige (Plato 1973; *Phaedo* 79d). Hoewel Plato van die statiese wese van dinge praat, is dit sy bedoeling om aan te toon dat verandering alleen vasgestel kan word indien iets duursaam of konstant aangeneem (of veronderstel) word. Sy spekulatiewe oplossing, naamlik om in 'n bo-sinnelike sfeer van oervorme (statische ideë) na die element van konstansie te soek, hoef ons vandag nie meer te aanvaar nie. Waarvan egter nie afstand gedoen hoef te word nie, is sy insig dat konstansie inderdaad 'n voorwaarde vir verandering is. Hoe hierdie insig egter verstaan moet word, is 'n volgende probleem. Aan Galilei en Einstein (inersie en die vakuumsnelheid van lig) dank ons die bykomende insig dat die idee van konstansie in werklikheid die kernbetekenis van beweging na vore bring, gewoonlik deur fisici verwoord in hul verwysing na 'uniforme' of 'eenparige (reglynige) beweging'.

Aan die begin van die twintigste eeu wou die positivisme egter alle klem op sintuiglike waarneming [*sense data*] plaas. Sodra navraag egter beskryf word oor die status van die terme waarop daar sintuiglik waargeneem is, ontstaan die probleem rakende die aspekte van getal, ruimte, beweging en die fisiese. Dit dui primêr op wyses van bestaan wat ons ervaring van fisiese entiteite hoegenaamd moontlik maak.

Leibniz het tyd ook aan (aritmetiese) suksessie (dit is aan getal) verbind (Leibniz 1965:199). Einstein egter het met sy spesiale relativiteitsteorie besef dat ruimte(-like) gelyktydigheid deur beweging gerelativeer word. Vroeër het Kant, ondanks die algemene onderskeid wat hy tref tussen ruimte en tyd, op een plek in sy *Kritiek van die suiwere rede* (Kant 1787:B:219) gelyktydigheid as een modus van tyd aangedui.⁴ Sistematies gesien, kan daar derhalwe nie alleen sinvol onderskei word tussen die getalstydorde van opeenvolging, die ruimtelike orde van gelyktydigheid en die kinematiese tydorde van uniformiteit nie, want ons moet ook die onomkeerbare fisiese tydorde verreken – die oorsaak kom vóór die gevolg.⁵

Cassirer (1953) is bewus van hierdie kondisionerende aspekte, maar tipeer hulle ongelukkig as 'logies matematiese konstantes'. Hy stel samevattend:

4. 'Die drei modi der Zeit sind Beharrlichkeit, Folge und Zugleichsein' [Die drie modi van die tyd is duursaamheid, suksessie en gelyktydigheid].

5. Die tydorde in die eerste drie tydsmodi is omkeerbaar. Ons sal sien dat Einstein die kinematiese en fisiese aspekte met behulp van (on)omkeerbaarheid onderskei het.



If we desire to bring all of these constants into a short formula, we can point out the concept of number, the concept of space, the concept of time,⁶ and the concept of function⁷ as the fundamental elements, which enter as presuppositions into every question which physicists can raise. [*As ons graag al hierdie konstantes in 'n kort formule wou saamvat, kan ons verwys na die getalsbegrip, die begrip ruimte, die begrip tyd en die begrip van funksie as die basiese elemente wat as voorveronderstelling meespeel in elke vraag wat deur die fisika gestel word.*] (bl. 420, [outeur se eie vertaling])

Die fundamentele konstante elemente wat in elke fisikavraag veronderstel word, is konstitutiewe, aprioriese bou-elemente van die werklikheid. Daarsonder kan, volgens Cassirer, geen fisiese vraagstelling of teorie sinvol geformuleer word nie. Hierdie boustene is nie alleen onmisbare voorveronderstellings nie, want elkeen is tegelyk onherleibaar (d.w.s. uniek en onmisbaar), asook onverbreeklik samehangend met die ander. Cassirer (1953)⁸ verwoord dit soos volg:

None of these concepts can be spared or reduced to another⁹ so that, from the standpoint of the critique of cognition, each represents a characteristic motive of thought: but on the other hand, each of them possesses an actual empirical use only along with the others and in systematic connection with them. [*Geeneen van hierdie begrippe kan weggelaat of tot 'n ander gereduseer word nie, sodat, vanuit die standpunt van 'n kenniskritikus, elkeen 'n karakteristieke denkmotief verteenwoordig: maar aan die ander kant besit elkeen van hulle slegs 'n aktuele empiriese gebruik saam met die ander en in 'n sistematiese samehang daarmee.*] (bl. 420, [outeur se eie vertaling])

Dit handel hier inderdaad oor die bogemelde aspekte wat ons ervaring van konkrete dinge as onmisbare boustene eerstens moontlik maak. Sedert Immanuel Kant word die bestaansvoorwaardes (kondisies) van iets ook as 'transendentiaal' aangedui. Hierdie kondisies is daarom beide apriories en transendentiaal ten opsigte van ons empiriese ervaring van entiteite.¹⁰ Wat Cassirer as 'n kenmerkende denkmotief aandui, verwys eintlik reeds na die betrokkenheid van 'n wetenskaplike onderzoeker wat een of ander (onties gegewe) aspek van die werklikheid beklemtoon het as invalshoek van waaruit die werklikheid teoreties ondersoek kan word. In hierdie siening word die (ontiese) bestaanswyses van dinge tot (teoretiese) verklaringswyses verhef. Indien ons egter die klem op die oorspronklike gegewenheid van hierdie aspekte laat val,

6.Tyd word dikwels met beweging vereenselwig.

7.Die term 'funksie' is van die oorspronklike fisiese sin van energiewerking afgelei. Dikwels word daar oor aspekte met behulp van aspekterme gepraat. Dit betref selfs die woord 'aspek' wat verwys na die kant van 'n twee- of driedimensionele ruimtefiguur. Die term 'modus' (= bestaanswyse) verwys implisiet na die fisiese aspek, want ons leer ken die wyse waarop dinge bestaan uit die manier waarop hulle funksioneer. Hieruit blyk dat die term 'funksie' 'n fisiese herkoms het en in die aanhaling van Cassirer sinoniem is met wat ons die fisiese aspek noem.

8.Die eerste Engelse uitgawe van *Substanzbegriff und Funktionsbegriff* is in 1923 gepubliseer, terwyl die eerste Duitse uitgawe in 1910 verskyn het. Die eerste Engelse vertaling van Cassirer's se manuskrip oor Einstein se relativiteitsteorie is ook in hierdie werk opgeneem.

9.Cassirer se erkenning van onherleibaarheid in hierdie verband belig tegelyk die algemene wetenskapsteoretiese insig dat enige logiese proses van definiëring vroeër of later by ongedefinieerde terme [*primitives*] eindig, want anders loop ons denke in 'n oneindige regressie vas (vgl. die verwysing na Gödel in Yourgrau 2005:169). Die keersy van uniekheid is samehang.

10.Kant het egter die werklikheidsvoorwaardes (onties kondisies) wat dinge ten grondslag lê, vereenselwig met die menslike denkkategorieë. Gevolglik stel hy: 'Die verstand skep sy wette (apriori) nie uit die natuur nie, maar skryf dit aan die natuur voor' (vgl. Kant 1783:II:320; §36 en ook Kant 1781–A:163).

teenoor die teoretiese refleksie daaroor, kan ons ewe goed van die transendentiaal empiriese metode van ondersoek praat.

Die weg is hiermee geopen om aandag te skenk aan die doodloopstraat waarin die positivisme sigself bevind. Om dit te verduidelik verwys ons allereers na Max Planck se onderskeiding tussen die werklike buitewêreld,¹¹ die wêreld van alles wat sintuiglik waarneembaar is, en die wêreld van die fisika as wetenskaplike dissipline (Planck 1973:208). Vogel merk hierby op dat die abstraksies wat in die wêreldbeeld opgeneem is, nie vir Planck sintuiglik waarneembaar is nie. Hy verwys na die bekende wetmatighede en na begrippe soos ruimte, tyd en kousaliteit (Vogel 1961:149) – gegewens wat eintlik na die [getalsaspek], ruimte-aspek, kinematiese aspek en fisiese aspek verwys.

Wanneer 'n fisikus oor sintuiglik waarneembare inligting praat, word aspekterme gebruik. Geeneen van hierdie aspekte is egter as sodanig sintuiglik waarneembaar nie. Dit is absurd om te vra: Wat is die kleur van die getalsaspek? Wat weeg die ruimte-aspek? Hoe voel die bewegingsaspek? en: Hoe smaak die fisiese aspek? Dit demonstreer die teoretiese onhoudbaarheid van die positivistiese stelling ondubbelsinnig. Die vraag is nou of hierdie 'sintuiglik niewaarneembare' aspekte 'n rol in Einstein se relativiteitsteorie speel.

Waarop berus die besondere en algemene relativiteitsteorie?

Einstein se kritiek op die klassieke meganistiese fisika sal die weg baan tot 'n aanduiding van die *apriories gefundeerde rol* wat die kinematiese en die fisiese aspekte in sy benadering tot teoretiese kennis speel.

Die onderskeid wat Einstein (1959) tussen die kinematiese en die fisiese aspekte van die werklikheid tref, maak gebruik van die verskil tussen omkeerbaarheid en onomkeerbaarheid:

On the basis of the kinetic theory of gases Boltzman had discovered that, aside from a constant factor, entropy is equivalent to the logarithm of the 'probability' of the state under consideration. Through this insight he recognized the nature of courses of events which, in the sense of thermodynamics, are 'irreversible'. Seen from the molecular-mechanical point of view, however, all courses of events are reversible.¹² [*Volgens die grondslag van die kinetiese teorie van gasse het Boltzman ontdek dat, afgesien van die konstante faktor, entropie gelyk is aan die logaritme van die 'waarskynlikheid' van die staat wat oorweeg word. Hierdie insig het hom in staat gestel om die aard van reekse gebeurtenisse te sien wat termodinamies 'onomkeerbaar' is. Beskou vanuit die molekuler meganiese oogpunt egter, is alle reekse gebeurtenisse omkeerbaar.*] (bl. 43, [outeur se eie vertaling])

Einersyds wys Einstein hiermee, saam met Planck en eventueel die meeste twintigste-eeuse fisici, die lank dominante meganistiese standpunt in die fisika af, want daarvolgens

11.Von Weizsäcker merk op dat ook Einstein volgehou het dat die werklikheid onafhanklik van ons waarneming moet bestaan (Von Weizsäcker 2002:279).

12.Elders verwoord Einstein ook sy negatiewe waardering van die meganistiese raamwerk van die klassieke fisika (sien Einstein [1920] 1985:146).



is alle fisiese prosesse omkeerbaar en derhalwe prinsipiëel tot meganiese beweging herleibaar (sien Planck 1973:53). Andersyds open Einstein hiermee die weg tot 'n sinvolle onderskeid tussen die kinematiese en fisiese aspekte van die werklikheid. Peter Janich beklemtoon hierdie gesigspunt in verskillende van sy geskrifte. In 1975 verwys hy na die onderskeid tussen 'kinematiese (*phoronomischer [im folgenden kinematisch genannt]*) en dinamiese stellings' (Janich 1975:68–69). In 'n meer onlangse geskrif tref hy hierdie onderskeid in die breër konteks van belangrike oorgangsgebeure in die wiskunde, fisika, chemie en logika gedurende die laat negentiende en vroeg twintigste eeue (sien Janich 2009:140 e.v.).¹³ In sy oorspronklike artikel geskryf in 1905 begin Einstein met die definisie van gelyktydigheid wat hy in die konteks van die kinematiese afdeling daarvan plaas (sien Einstein 1905, asook Einstein [1920] 1985:25 e.v.).

Die bydrae wat die kinematiese perspektief lewer, verduidelik Einstein in vermeldde artikel, met verwysing na twee waarnemers wat hulle met hul onderskeie horlosies op twee punte, naamlik A en B, bevind. 'n Waarnemer by punt A in die ruimte kan die tydwaardes van gelyktydige gebeure in die onmiddellike omgewing van A vasstel – en dieselfde geld vir 'n waarnemer by punt B. Sonder 'n verdere aanname is dit egter nie moontlik om 'n gebeurtenis by punt A met 'n gebeurtenis by punt B te vergelyk nie, want daar is nog nie gekom tot die definiëring van 'n gemeenskaplike 'tyd' vir A en B nie. So 'n gemeenskaplike 'tyd' verg dat per definisie aangeneem word dat die 'tyd' wat lig nodig het om van A na B te beweeg, gelyk is aan die 'tyd' wat dit nodig is om van B na A te beweeg. Die werklike snelheid van lig as sodanig is nie deurslaggewend nie. Die beslissende punt is dat die gemeenskaplike 'tyd' dieselfde van A na B en van B na A moet wees, dit wel sê dat dit konstant moet wees. Wat hierdie snelheid in werklikheid is, is 'n tweede vraag. Implisiet in hierdie aanname is ook dat die gepostuleerde snelheid 'n bo-grens daarstel – niks kan vinniger beweeg nie. Einstein spesifiseer dit ook as die 'vakuumsnelheid van lig' (Einstein 1959:54) of as 'die beginsel van die konstansie van die snelheid van lig' (Einstein [1922] 1982:32).

Die besef van 'n uniforme en reglynige beweging belig die oorspronklike kinematiese sin van konstansie. Einstein praat byvoorbeeld van uniforme, reglynige en nieroterende beweging (Einstein 1985:61). Einstein het egter nie daaraan gedink om liefs na die wet van energiebehoud as die wet van energiekonstansie te verwys nie. Binne die struktuur van die fisiese aspek ontmoet ons immers 'n analogie in die kinematiese aspek en hierdie analogie word beliggam in die sinfiguur van energiekonstansie (net soos wat massa 'n getalanalogie in die fisiese aspek verteenwoordig: massa is 'n energetiese hoeveelheid).

Die oorspronklike gegewenheid van konstansie as kernsin van die kinematiese aspek verklaar ook waarom beweging 'n gegewe is wat in die oorspronklike (onherleibare) aard

13. In Yourgrau se lesenswaardige geskrif oor Einstein en Gödel kom hierdie onderskeiding telkens ter sprake (vergelyk slegs Yourgrau se werk van 2005 – bladsye 36, 114, 115, 123, 129, 133 en 142).

daarvan geen fisiese oorsaak benodig nie. Die wet van inersie¹⁴ verklaar waarom nie na die oorsaak van beweging nie, maar slegs na die oorsaak van 'n verandering van beweging gevra kan word (sien Von Weizsäcker 2002:172).

Die besondere en algemene relatiwiteitsteorie berus derhalwe in die eerste plek op wat ons hier onder as die modale universaliteit van die kinematiese en fisiese aspekte aandui. Die spesiale relatiwiteitsteorie is allereers 'n suiwer kinematiese teorie wat streng gesproke as 'n teorie van konstansie gesien moet word, omdat die sleutelaanname in 'n konstante gevind word. 'n Voorwerp beweeg relatief ten opsigte van 'n ander voorwerp of 'n referensiesisteem. Beide is natuurlik in beweging begrepe. Wel is dit so dat in die relatiwiteitsteorie elkesnelheid in verhouding tot die konstante ligsnelheid bereken word. Einstein praat van die beginsel van die fisiese relatiwiteit van alle uniforme beweging (Einstein [1920] 1985:59). Die volledige inhoud van Einstein se spesiale relatiwiteitsteorie is volgens hom saamgevat in die postulaat: Die wette van die natuur is invariant ten opsigte van die Lorentz-transformasies (Einstein [1920] 1985:148). Waar die spesiale relatiwiteitsteorie na Galileaanse domeine verwys waarin geen gravitasieveld bestaan nie, bevat die algemene relatiwiteitsteorie, naas hierdie Galileaanse domeine, ook verwysings na nie-Galileaanse liggamme (Einstein [1920] 1985:98).¹⁵ In die algemene relatiwiteitsteorie word gevolglik aandag gegee aan die fisiese realiteit van 'n nie-uniforme beweging binne die kader van die gravitasieveld (Einstein [1920] 1985:62 e.v.).¹⁶ Die bydrae van Einstein se algemene relatiwiteitsteorie bevat die insig dat fisiese ruimte, soos vergestalt in sy begrip van 'veld', 'n onherleibare modus van verduideliking aan ons bied, soortgelyk aan die begrip materie in Newton se teorie (Einstein [1920] 1985:150, 151, 153). Einstein se kritiek op die klassieke meganistiese fisika sal die weg baan tot 'n aanduiding van die funderende aprioriese rol wat die kinematiese en die fisiese aspekte in sy benadering tot teoretiese kennis speel. (Einstein [1920] 1985:151). Vir Einstein bestaan daar glad nie iets soos 'n leë ruimte, dit wil sê 'n ruimte sonder veld nie. (Einstein [1920] 1985:155).¹⁷

Modaal apriories en entiteitsaposterories

Immanuel Kant het 'n onderskeid getref tussen ongespesifiseerd universele wette en empiriese wette – en hy het slegs

14. Einstein merk op dat inersie en die konstantheid van die snelheid van lig slegs geldig is met betrekking tot 'n inerte sisteem (Einstein [1920] 1985:150).

15. Penrose (2004) onderskei tussen twee basiese fasette van Einstein se relatiwiteitsteorie 'namely the principle of *relativity*, which tells us that the laws of physics are blind to the distinction between stationarity and uniform motion, and the principle of *equivalence* which tells us how these ideas must be subtly modified in order to encompass the gravitational field'... [naamlik die beginsel van relatiwiteit, wat ons inlig dat die wette van die fisika blind is vir die onderskeiding tussen stasionêre en uniforme beweging, en die ewkwalensiebeginsel wat ons inlig hoe hierdie idees subtiel gemodifiseer moet word om ook die swaartekragveld te omvat] (ble. 399–400, [outeur se eie vertaling])

16. Die basiese eis van die spesiale relatiwiteitsteorie rakende die invariansie van die wette met betrekking tot die Lorentz-transformasies is te eng vir die algemene relatiwiteitsteorie, want daarvolgens moet die invariansie van die wette ook gepostuleer word met betrekking tot nieliniêre transformasies van koördinate in 'n vierdimensionale kontinuum (vgl. Einstein 1959:66, 74). Hy wys op hierdie bladsy ook daarop dat hy fisiese redes moes aangee vir die feit dat invariansie met betrekking tot die wyer groep in die fisika vereis word.

17. Die verband tussen gravitasie en die 'gekromde wêreldruimte' het Einstein tot sy bekende siening gebring dat alhoewel die heelal onbegrens is, dit steeds eindig is (sien Einstein [1920] 1985:108–112).



eersgenoemde as apriories bestempel: 'Ons moet veeleer onderskei tussen empiriese natuurwette wat altyd spesifieke waarnemings veronderstel en suiwere of universele natuurwette' (Kant [1783] 1969, par. 36, bl. 320).

Die implikasie van hierdie onderskeid is dat die reikwydte van aspekwette (soos die kinematiese wet van inersie en die fisiese wet van energiekonstansie) ongespesifiseerd universeel is in die sin dat alles wat bestaan, ongeag die tipiese aard daarvan, deur dergelike wette bepaal en begrens word. Aspek wette kan ook as modale wette beskryf word, aangesien dit wette is wat die verskillende wyses (modi) waarop dinge bestaan, reguleer.¹⁸ Omdat modale wette van die tipiese aard van dinge afsien, omvat die effek daarvan alle moontlike entiteite.¹⁹ Tipiese wette daarenteen is beperk bloot tot daardie entiteite wat tot hierdie spesifieke tipe behoort. Hoewel die wet vir atome universeel is in die gespesifiseerde sin dat dit vir alle atome geld, is dit nie ongespesifiseerd universeel soos modale wette nie, want alles in die werklikheid is nie atome nie. Die bekende wiskundige Hermann Weyl belig hierdie verband wanneer hy daarop wys dat aprioriese konstruksies verbind is aan ervaring en 'n analise van ervaring deur die eksperiment (Weyl 1966:192). In teenstelling met aprioriese modale wette wat deur middel van modale abstrahering opgespoor kan word (sien Stafleu 1980:6, 11), word aposterioriese tipewette deur middel van die eksperiment in sig gekry (of minstens deur middel van ons ervaring van verskillende tipes dinge).

In Einstein se relatiwiteitsteorie word duidelik, op die implisiete basis van modale abstrahering, geappelleer op die modale universaliteit van die kinematiese en fisiese aspekte. Stegmüller ([1954] 1969) stel in ooreenstemmende sin:

Dit kan sekerlik nie impliseer dat die totaliteit van wetstellers wat in 'n natuurwetenskap aanwesig is, van 'n aprioriese aard sal wees nie. Veel eerder sal so 'n apriorisme sigself moet beperk tot die konstruksie van 'n beperkte getal geldige wetrelasies, terwyl origens alle meer spesifieke natuurwette afhanklik sal wees van empiriese toetsing. (bl. 316)

Vir Cassirer gaan dit hier oor rasonale en empiriese kennis. Die aprioriese karakter van die aspekte van die werklikheid, in die sin dat dit eerstens die erwaarbare werklikheid op 'n ongespesifiseerd universele wyse moontlik maak, kom by Cassirer (1953) na vore wanneer hy dit plaas in die perspektief van universele funksies van rasonale en empiriese kennis:

These functions themselves form a fixed system of conditions; and only relative to this system do assertions concerning the object, as well as concerning the ego or subject, gain an intelligible meaning [Hierdie funksies vorm self 'n vaste sisteem van kondisies. Slegs relatief tot hierdie sisteem verkry stellings rakende die objek sowel as met betrekking tot die ego of subjek 'n verstaanbare betekenis] (bl. 309, [outeur se eie vertaling])

Op dieselfde bladsy vervolg hy:

There is no objectivity outside of the frame of number and magnitude, permanence and change, causality and interaction:

18. Dit hou ook verband met die gegewe dat die Griekse en Middeleeuse begrip van dinge (substansiebeprip) sedert die Renaissance veral in die natuurwetenskappe met relasiebeprippe vervang is – 'n sleuteltema in Cassirer se werk van 1910.

19. Von Weizsäcker stel dat 'n toereikend abstrakte formulering van die kwantumteorie 'n voorbeeld van 'n universele teorie vir alle 'groepe van voorwerpe' is [Gegenstandsklassen] (Von Weizsäcker 1993:128).

all these determinations are only the ultimate invariants of experience itself, and thus of all reality, that we can establish in it and by it.²⁰ [Daar bestaan geen objektiwiteit buite die raamwerk van getal en grootte, permanensie en verandering: al hierdie bepalings is bloot die uiteindelijke invariante van die ervaring en derhalwe van die ganse werklikheid wat ons in en daarmee kan vasstel.] (Cassirer 1953:309, [outeur se eie vertaling])

Wanneer ons hierdie relasiekaders in hul ongespesifiseerde universaliteit verstaan, moet ons erns maak met die onties gegewe aard daarvan, asook met die modale universaliteit wat in elkeen opgesluit lê. Tegelyk moet ons ook die relatiewe regmatigheid van die positivistiese aanspraak op eksperimentele toetsing ernstig opneem wanneer dit handel oor tipewette, dit wil sê die tiponomie²¹ van 'n beperkte groep entiteite. Die bogemelde sienings van Kant, Weyl, Cassirer, Stegmüller en Von Weizsäcker dui almal op 'n erkenning van die aposterioriese kennisverwerwing van tipewette, teenoor die aprioriese (modaal abstraherende) wyse waarop modale wette (aspek wette) geken word. Heisenberg onderskei tussen die wesenlike eienskappe van materie en die universele eienskappe daarvan. Laasgenoemde eienskappe word weliswaar ook by alle materie aangetref sonder dat dit tot die wesenlike begrip daarvan behoort. Wat Heisenberg hier 'wesenlik' noem, verwys na tipewette en wat hy 'universele eienskappe' noem, het betrekking op die (ongespesifiseerde) universaliteit van modale eienskappe. Let op die modaal universele eienskappe wat hy noem, soos traagheid, gewig en deelbaarheid (Heisenberg 1956:101).

Heisenberg ontleed materie hier in terme van die mees basiese werklikheidsaspekte, want dit besit 'n bepaalde hoeveelheid wat gewoonlik massa [*Masse*] genoem word, dit besit uitgebreidheid in die ruimte asook 'n vormbegrensing. Verder word daar aan die materie ondeurdringbaarheid toegeskryf (twee verskillende stukke materie kan nie gelyktydig dieselfde ruimte beset nie). Laastens is materie as onvernietigbaar aangedui (waarmee Heisenberg na die bogemelde wet van energiekonstansie verwys).²²

Die vermeende 'misterie' in die toepaslikheid van modale wette

Indien ons erkenning verleen aan die ontiese aard van modale universaliteit, word onverkort vasgehou aan die perspektief dat alle (natuurlike en sosiale) entiteite aan beide modale en tipewette onderworpe is. Die implikasie van hierdie erkenning is dat dit ontologies vanselfsprekend is dat die mens deur middel van wetenskaplike ondersoek wette verstandmatig kan formuleer wat van toepassing is op dinge in die werklikheid. Wanneer die ontiese status van modaal universele wette egter misken word, sal dit 'n misterie bly hoekom 'verstandswette' byvoorbeeld op natuurverskynsels toepaslik is. Die woordkeuse hier verwys na die wyse waarop Von Weizsäcker die kennisprobleem van

20. Einstein gebruik die terme 'konstansie' en 'invariansie' as wissel terme (vgl. byvoorbeeld Einstein [1922] 1982:37).

21. Die Griekse woord *nomos* beteken wet – hier verbind aan 'n beperkte groep entiteite wat tot die spesifieke tipe behoort.

22. Hierdie wet van energiekonstansie belig die onverbreeklike samehang tussen die kinematiese en fisiese aspekte.



Kant geformuleer het: 'Wat is die natuur dat dit wette moet gehoorsaam wat die mens verstandmatig kan formuleer?' (Von Weizsäcker 1972:128).

Die kontemporêre logikus en filosoof, Alvin Plantinga, verwys na verskeie denkers wat hierdie 'wonderwerk' of 'misterie' aan die orde stel:

According to Erwin Schrödinger, the fact that we human beings can discover the laws of nature is 'a miracle that may well be beyond human understanding' ... According to Eugene Wigner, 'The enormous usefulness of mathematics in the natural sciences is something bordering on the mysterious, and there is no rational explanation for it' ... and 'It is difficult to avoid the impression that a miracle confronts us here, quite comparable in its striking nature to the miracle that the human mind can string a thousand arguments together without getting itself into contradictions, or to the two miracles of the existence of laws of nature and of the human mind's capacity to derive them' (p. 7). And Albert Einstein thought the intelligibility of the world a 'miracle or an eternal mystery'... [Volgens Erwin Schrödinger is die feit dat mense die wette van die natuur kan ontdek 'n wonderwerk wat sekerlik wel die menslike verstand te bowe gaan' ... Volgens Eugene Wigner is 'die uiterste bruikbaarheid van die wiskunde in die natuurwetenskappe iets wat grens aan die misterieuse, en daarvoor bestaan geen rasionele verduideliking nie' ... en 'Dit is moeilik om die indruk af te skud dat ons hier met 'n wonderwerk te doen het wat heeltemal vergelykbaar in die treffende aard daarvan is met die wonderwerk dat die menslike verstand duisend argumente kan saamvoeg sonder om in kontradiksies te vervel of met die twee wonderwerke van die bestaan van natuurwette en van die menslike vermoë om dit te kan aflei' (p. 7). En Albert Einstein het gedink dat die verstaanbaarheid van die wêreld 'n wonderwerk of 'n ewige misterie is'.] (sien Plantinga 1993:232, voetnoot 2, [outeur se eie vertaling])

Deurslaggewend is dat die modale aspekte medebepalend [codetermining] is vir die bestaan van konkrete entiteite. In die algemeen kan daarom gestel word dat geen enkele entiteit aan die draagwydte van getalswette, ruimtewette, bewegingswette of fisiese wette kan ontkom nie. Die uitdrukking 'medebepalend' laat nogtans ruimte vir die tipiese spesifikasie wat hierdie (universele) modale wette kragtens die onderskeie tipewette van verskillende groepe entiteite ontvang. D'Espagnat wys daarop dat die verbintenis met die werklikheid (van dit wat bestaan) indirek is en eerder afgelei as waargeneem word. Dit bring ons, volgens hom, uit by die begrip 'wet': 'But the link is indirect and inferred rather than observed since, as we saw, a detour via the notion of "law", nay, even of "observational predictive law", proved necessary'. [Maar die konneksie is indirek en afgelei eerder as waargeneem, aangesien 'n omweg via die begrip van 'wet', nee, selfs van 'n 'waargeneemde voorspellingswet', soos ons gesien het, noodsaaklik blyk te wees.] (D'Espagnat 2006:125). In 'n wetenskaplik teoretiese geskrif verklaar ook Pannenberg dat wette en wetmatighede alleenlik vasgestel kan word aan dit wat kontingent is (Pannenberg 1973).

Die verdiskontering van die kondisionerende rol van modale aspekte kan dus nie aan die formulering van universele modale wette verbygaan nie. Juis kragtens die ontiese universaliteit van modale wette – wat derhalwe nie blote denkkonstruksies is nie – omspan dergelike wette die

funksionering van entiteite binne hierdie aspekte. Daarom is dit ook glad nie 'n misterie of wonderwerk dat ons insig in die aard van wiskundige, ruimtelike, bewegings- en fisiese wette inderdaad met die werklike wêreld verband hou nie! Dit is daarom nie bloot toevallig dat ons van aspekte van die werklikheid praat nie.

Wiskunde en die fisiese werklikheid

Kant meen dat daar in elke teorie van die natuur net soveel wetenskap aanwesig is as wat wiskunde daarin aangetref word (Kant 1786:IX). Hiermee kontinueer Kant 'n element van Descartes se positiewe waardering vir die wiskunde. Met 'n effens anderse fokus kies Einstein 'n ander waardering vir die status van die wiskunde wanneer dit handel oor die relasie daarvan tot die werklikheid. Hy verklaar dat insoverre die stelling van die wiskunde op die werklikheid betrekking het, hulle nie seker is nie, en insoverre hulle seker is, hulle geen betrekking op die werklikheid het nie (Einstein 1921:124). Dit beteken dat Einstein die werklikheidsbetrokkenheid van wiskundige formulering in die fisika ook relativer. En tegelyk verwerp hy enige dualisme tussen aprioriese kennis en die ervaarbare werklikheid, wat beteken dat sy benadering ook met die vroeër vermelde uitdrukking transendentiaal empiries getipeer kan word.

Tereg wys hy daarop dat filosofe die bedenklige weg gevolg het om die aprioriese aan die toeganklike kontrole van die 'empiries doelmatige' te onttrek. Hierdie filosofe het die aprioriese tot afgeslote denknoodwendighede beperk. Gevolglik moes fisici weer begrippe soos ruimte en tyd vanuit hierdie geïsoleerde gebied terugwin om die bruikbaarheid daarvan te herstel. Dit beteken egter nie dat sulke begrippe bloot deur die logika (of wat dan ook) uit die ervaring afgelei kan word nie, want in 'n bepaalde sin is hierdie begrippe 'vrye skeppinge van die menslike gees' hoeseer hulle nie, soos die klere van die liggaam, onafhanklik van ons ervaring is nie (Einstein [1992] 1982:6).

Einstein se afwysing van apriories filosofiese denkkonstruksies bevraagteken nie die apriories ontiese status van die verskillende werklikheidsaspekte nie en ook nie die aard van kreatiewe wetenskaplike denke nie, soos onder meer bevestig word deur sy aanname van 'n (kinematiese) konstante wat as bo-grens van snelheid kan optree. Einstein gaan inderdaad transendentiaal empiries te werk en bied daarmee stof tot nadenke vir die debat oor positivisme wat in reaksie op sy werk sou volg.

Die bekende chemikus wat 'n prominente figuur in die filosofie van die wetenskap in die twintigste eeu sou word, Michael Polanyi, het hierdie debat oor positivisme rondom Einstein se posisie verder gevoer op grond van korrespondensie met Einstein. Polanyi berig dat Einstein hom in 1954 gemagtig het om die stelling te publiseer dat die Michelson-Morley eksperiment 'n geringe effek op die ontdekking van relatiwiteit gehad het (sien Polanyi 1958:10–11).

Later kom Einstein eksplisiet na die *aether*-kwessie terug deur te stel dat elke veld beskou moet word as 'n toestand



waarvan 'n meganiese interpretasie moontlik is en dat dit die aanwesigheid van materie veronderstel: 'One thus felt compelled, even in the space which had hitherto been regarded as empty, to assume everywhere the existence of a form of matter, which was called "aether"'. [*'n Mens het sodoende verplig gevoel om orals, selfs in die ruimte wat tot dusver as leeg beskou is, die bestaan van 'n vorm van materie aan te neem wat 'eter' genoem word.*] (Einstein [1920] 1985:146).

Die eter het as't ware verskyn as die beliggaming van 'n ruimte wat in absolute rus verkeer (Einstein [1920] 1985:147). Die spesiale relatiwiteitsteorie van Einstein het daarenteen juis aangetoon dat staties ruimtelike gelyktydigheid deur die sin van beweging gerelativeer word. Einstein se eie formulering lui soos volg: 'Since the special theory of relativity revealed the physical equivalence of all inertial systems, it proved the untenability of the hypothesis of an aether at rest' [*Aangesien die spesiale relatiwiteitsteorie die fisiese ekwivalensie van alle inerte sisteme openbaar, is die onverdedigbaarheid van die hipotese van 'n rustende eter bewys.*] (Einstein [1920] 1985:149).²³

Die vraag of Einstein se publikasie werklik substansieel deur die eksperimente van Michelson en Morley beïnvloed is, sal lewend gehou word deur die feit dat die eerste sin van die tweede paragraaf van die oorspronklike artikel in 1905 van hom anoniem verwys na:

... unsuccessful attempts to discover any motion of the earth relatively to the 'light medium'. Examples of this sort, together with the unsuccessful attempts to discover any motion of the earth relatively to the 'light medium', suggest that the phenomena of electrodynamics as well as of mechanics possess no properties corresponding to the idea of absolute rest. [*... onsuksesvolle pogings om enige beweging van die aarde relatief tot die 'ligmedium' te ontdek: Voorbeelde van hierdie aard, tesame met die onsuksesvolle pogings om enige beweging relatief tot die 'ligmedium' te ontdek suggereer dat die elektrodinamiese verskynsels sowel as meganiese prosesse, geen eienskappe besit wat met die idee van absolute rus ooreenstem nie.*] ('The Electronics of Moving Bodies' 1905, [outeur se eie vertaling])

Hoewel Grünbaum (1974:386) die ekstreme posisie van Polanyi bevraagteken, moet hyself toegee 'that it is quite incorrect to suppose, as is done in some quarters, that the Michelson-Morley experiment furnishes a sufficient experimental basis for the light principle' [*... dat dit heeltemal verkeerd is om aan te neem, soos in sommige kringe gedoen word, dat Michelson-Morley se eksperiment 'n toereikende eksperimentele basis vir die ligbeginsel bied.*]

Die snelheid van lig en die neutrino

In sy werk oor ruimte en tyd bespreek Grünbaum Einstein se beginsel van die konstantheid van die snelheid van lig (Grünbaum 1974:376) en vermeld dan tereg dat dit 'n bo-grens betref wat slegs in 'n vakuum gerealiseer word (Grünbaum 1974:377). Hy wys egter daarop dat Einstein nie

23. Einstein se siening relativeer ook die klassieke teenstelling tussen 'rus' en 'beweging'. In 'n brief aan Moritz Schlick (07 Junie 1920) skryf Einstein: 'Rest is a dynamic event in which the velocities are constantly zero, one that for our consideration is, in principle, equivalent to any other event of motion' [*Rus is 'n dinamiese gebeurtenis waar die snelhede gedurig nul is, een wat, vir ons oorweging, gelyk is aan enige ander gebeurtenis in beweging*] (Einstein 2006:186).

noodwendig beweer dat so 'n sinjaal werklik bestaan nie. Stafleu stel dit soos volg: 'The empirically established fact that the velocity of light satisfies the hypothesis is comparatively irrelevant' [*Die empiries vasgestelde feit dat die snelheid van lig hierdie hipotese bevestig, is vergelykenderwys irrelevant.*] (Stafleu 1980:89.)

Hierdie situasie belig nogeens die transendentiaal empiriese metode waarvan Einstein gebruik maak en dit werp 'n ander lig op die tentatiewe resultate wat in 2011 die nuusmedia gehaal het rakende die neutrino wat volgens metings vinniger as die snelheid van lig sou beweeg (daar is voorheen altyd aangeneem dat die neutrino teen die snelheid van lig beweeg).

Grünbaum en Stafleu se opmerkings stem ooreen met wat ons vroeër oor die kinematiese sin van konstansie opgemerk het, naamlik dat Einstein se spesiale relatiwiteitsteorie op die aanname berus dat daar 'n konstante bogrens van snelheid is. Grünbaum wys trouens daarop dat daar in 1905 nog geen ondubbelsinnige eksperimentele bewyse was wat Einstein se postulaat dat lig die vinnigste sinjaal is, onderskryf het nie (Grünbaum 1974:399). Gevolglik sal Einstein se teorie nie weerlê word indien dit sou blyk dat die neutrino inderdaad vinniger as lig beweeg nie, want dan kan dit bloot die 'bo-grensrol' by lig oorneem.

Samevattende opmerking

Die benadering van Einstein wys sowel 'n eensydige apriorisme as 'n oordrewe positivisme af. Omdat hy wel ruimte laat vir skeppende denke, stel dit hom in staat om van die ontiese universaliteit van sleutelaspekte van die natuur gebruik te maak, by name die uniekheid en samehang tussen die kinematiese aspek en die fisiese aspek. Enersyds verskaf die onderskeid wat hy tref tussen hierdie twee aspekte 'n vertrekpunt om kritiek te lewer op die meganistiese hoofteendens van die klassieke fisika (toegesps op die onderskeid tussen omkeerbaarheid en onomkeerbaarheid), en andersyds help die ontiese universaliteit van hierdie aspekte hom om hul funderende rol, as onties aprioriese gegewens, tot hul reg te laat kom, ook ten opsigte van die eise wat die ervaring stel (die relatiewe reg van die positivistiese klem op die eksperimentele toetsing van tipewette). Daarom kan 'n mens Einstein se siening met reg as 'n transendentiaal empiriese benadering tipeer – wat impliseer dat selfs die mees onlangse beweringe oor die snelheid van die neutrino wat vinniger as dié van lig sou wees, nie Einstein se spesiale relatiwiteitsteorie (sal) weerlê nie.

Uit die voorafgaande volg dit ook dat die transendentiaal empiriese metode wat Einstein gebruik het 'n sinvolle alternatief vir die uiterstes van apriorisme en empirisme is. Soos wat beweging statiese ruimtelike gelyktydigheid relativeer en soos wat die beweging van enige inerte sisteem relatief is tot die konstanste snelheid van lig of die neutrino, impliseer die transendentiaal empiriese metode wat Einstein gebruik 'n gesonde wetenskaplike openheid wat die voorlopigheid, feilbaarheid en moontlikhede tot verbetering van alle wetenskaplike denke belig.



Literatuurverwysings

- Berkeley, G., [1710] 1969, *The Principles of Human Knowledge*, introduction by G.J. Warnock, The Fontana Library, London.
- Cassirer, E., 1953, 'Substance and Function', in *Einstein's Theory of Relativity Considered from the Epistemological Standpoint*, pp. 347–460, Dover, New York.
- Descartes, R., 1965, *A Discourse on Method, Meditations and Principles*, transl. J.Veitch, Everyman's Library, London.
- Espagnat, B., 2006, *On Physics and Philosophy*, Princeton University Press, Princeton.
- Einstein, A., 1921, Geometrie und Erfahrung, *Sitzungsberichte der Preußischen Akademie der Wissenschaften*, Erster Halbband, Berlin. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-49903-6>
- Einstein, A., 1959, 'Autobiographical Notes', in P.A. Schilpp (ed.), *Albert Einstein, Philosopher-Scientist*, n.p., Harper Torchbooks, New York.
- Einstein, A., [1922] 1982, *Grundzüge der Relativitätstheorie*, Neudruck von der 1969 Braunschweig-Ausgabe, Friedrich Fieweg & Sohn, Wiesbaden. PMID:1158428
- Einstein, A., [1920] 1985, *Relativity, the Special and General Theory*, Arrowsmith, Bristol. PMID:1646191
- Einstein, A., 2006, *The Collected Papers of Albert Einstein*, volume 10, transl. A. Hentschel, University Press, Princeton. PMID:16848696
- Einstein, A., 1905, 'The Electrodynamics of Moving Bodies', viewed 10 October 2011, from <http://www.fourmilab.ch/etexts/einstein/specrel/www/>
- Grünbaum, A., 1974, *Philosophical Problems of Space and Time*, 2nd edn., D. Reidel, Dordrecht.
- Heisenberg, W., 1956, *Das Naturbild der heutigen Physik*, Rowohlt, Hamburg.
- Hucklenbroich, P., 1980, 'Der physikalische Begriff der Materie', in Ritter, *Historisches Wörterbuch der Philosophie*, vol. 5, pp. 921–924, ScEinstein.hwabe & Co Verlag, Stuttgart.
- Hume, D., [1739] 1962, *A Treatise of Human Nature*, Collins/The Fontana Library, London.
- Janich, P., 1975, 'Tragheitsgesetz und Inertialsystem', in Chr. Thiel (hrsg), *Frege und die moderne Grundlagenforschung*, Hain, Meisenheim am Glan.
- Janich, P., 2009, *Kein neues Menschenbild. Zur Sprache der Hirnforschung*, Suhrkamp, Frankfurt am Main.
- Kant, I., [1781] 1956, *Kritik der reinen Vernunft*, Erster Ausgabe (A), Felix Meiner, Hamburg.
- Kant, I., [1783] 1969, *Prolegomena zu einer jeden künftigen Metaphysik die als Wissenschaft wird auftreten können*, Felix Meiner, Hamburg.
- Kant, I., 1786, *Metaphysische Anfangsgründe der Naturwissenschaft*, Herausgeber Wilhelm Weischdel, Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt.
- Kant, I., [1787] 1956, *Kritik der reinen Vernunft*. Zweite Aufgabe (B), Felix Meiner, Hamburg.
- Leibniz, G.W.H., 1965, 'Correspondence with Clarke', third paper, published in the translation by M. Morris: *Leibniz, Philosophical Writings*, Everyman's Library, London.
- Locke, J., [1690] 1964, *An Essay Concerning Human Understanding*, The Fontana Library, London.
- Planck, M., 1973, 'Die Stellung der neueren Physik zur mechanischen Naturanschauung' (Vortrag gehalten am 23. September 1910 auf der 82. Versammlung Deutscher Naturforscher und Ärzte in Königsberg i. Pr.), in M. Planck (Hrsg.), *Vorträge und Erinnerungen*, 9te Druck, 5te Auflage, pp. 52–68, Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt.
- Pannenberg, W., 1973, *Wissenschaftstheorie und Theologie*, Suhrkamp, Frankfurt am Main.
- Penrose, R., 2004, *The Road to Reality. A Complete Guide to the Laws of the Universe*, Vintage Books, London.
- Plantinga, A., 1993, *Warrant and Proper Function*, Oxford University Press, Oxford. <http://dx.doi.org/10.1093/0195078640.001.0001>
- Plato, 1960, *The Last Days of Socrates*, Including the Dialogue *Phaedo*, pp. 99–183, The Penguin Classics, Harmondsworth.
- Polanyi, M., 1958, *Personal knowledge; Towards a Post-Critical Philosophy*, University of Chicago Press, Chicago.
- Stafleu, M.D., 1980, *Time and Again, A Systematic Analysis of the Foundations of Physics*, Wedge, Toronto.
- Stegmüller, W., [1954] 1969, *Metaphysik, Skepsis, Wissenschaft*, Springer, Berlin/New York. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-92990-8>
- Vogel, H., 1961, *Zum Philosophischen Wirken Max Plancks. Seine Kritik am Positivismus*, Akademie-Verlag, Berlin.
- Von Weizsäcker, C.F., 1972, *Voraussetzungen des naturwissenschaftlichen Denkens*. Herderbücherei, Band 415, Carl Hanser Verlag, München.
- Von Weizsäcker, C.F., 2002, *Große Physiker, Von Aristoteles bis Werner Heisenberg*, Deutscher Taschenbuch Verlag, München.
- Weyl, H., 1966, *Philosophie der Mathematik und Naturwissenschaft*, 3, wesentlich erweiterte Auflage, R. Oldenburg, Wien.
- Yourgrau, P., 2005, *A World Without Time. The Forgotten Legacy of Gödel and Einstein*, Penguin, London.