

Licht op Einsteins lichtpostulaat

Time and space are modes by which we think, and not conditions in which we live.

Albert Einstein [11]

In het artikel *Het pad naar de speciale relativiteitstheorie* dat eerder in het NTvN [1] verscheen, wordt gesteld dat het lichtpostulaat van Einstein [2] onnodig is om de relativiteitstheorie te grondvesten. Dit berust echter op de veronderstelling dat dit postulaat een feitelijke uitspraak doet over het fysische gedrag van licht (elektromagnetische straling). Zoals Einstein in een latere publicatie heeft toegelicht [3], is het lichtpostulaat een afspraak over de synchronisatie van klokken die zo is ingericht dat de lichtsnelheid in ieder inertiaalsysteem per definitie dezelfde constante waarde heeft. Het lichtpostulaat is om deze reden wel degelijk een noodzakelijk onderdeel van de relativiteitstheorie. Omdat veel leerboeken en artikelen over de relativiteitstheorie dit belangrijke conceptuele aspect van het lichtpostulaat onderbelicht laten, volgt hieronder een nadere uitleg.

Inertiaalstelsels

De eerste aanname die nodig is om de speciale relativiteitstheorie op te stellen is het bestaan van inertiaalstelsels. Inertiaalstelsels worden gekarakteriseerd door de volgende uitspraken:

- Inertiaalstelsels bewegen ten opzichte van elkaar met constante snelheid langs rechte lijnen; in deze stelsels is geen collectieve versnelling meetbaar.
- In een inertiaalsysteem geldt de eerste wet van Newton: vrije deeltjes zonder onderlinge interactie bewegen met constante snelheid en richting.

- In inertiaalstelsels kan met behulp van meetlatten een euclidisch coördinatenrooster voor positiebepaling worden geconstrueerd. Op iedere ruimtelijke positie kan vervolgens een klok worden neergezet die de lokale tijd aangeeft.

Lokale tijd biedt echter geen beschrijvingskader voor de eerste wet van Newton en verdere theorievorming van beweging. Om mechanische basisbegrippen als snelheid en versnelling inhoud te geven moet eerst een procedure ontwikkeld worden om in ieder inertiaalstelsel een gemeenschappelijke globale tijd vast te leggen, dat wil zeggen een procedure

om klokken, die op vaste posities staan en ten opzichte van elkaar niet bewegen, gelijk te laten lopen. Op een abstracter niveau komt dit neer op de eis dat alle lokale waarnemers een gemeenschappelijk begrip van 'gelijktijdigheid' hebben: als in een inertiaalstelsel twee gebeurtenissen gelijktijdig zijn voor één waarnemer, dan zijn deze gebeurtenissen gelijktijdig voor alle waarnemers in hetzelfde inertiaalstelsel. Dit definieert de globale tijd.

Synchronisatie van lokale klokken

In het artikel *Het pad naar de speciale relativiteitstheorie* [1] wordt een proce-

dure voor synchronisatie beschreven waarbij een persoon met constante snelheid heen en weer wandelt tussen klokken om deze te synchroniseren. Met een constante snelheid bewegen vereist dat deze persoon in het bezit is van een draagbare klok die hij/zij tijdens het lopen kan aflezen. De draagbare klok is dus in rust in een ander inertiaalstelsel dan de klokken die met elkaar vergeleken moeten worden. Dat is relevant omdat uiteindelijk zal blijken dat deze procedure alleen kan werken als de transportsnelheid niet-relativistisch klein is [4]. Daarom wordt deze vorm van synchronisatie in de literatuur *slow clock synchronization* genoemd [8].

Voor synchronisatie van klokken in een lokale omgeving kan kloktransport volstaan. Als procedure voor het vastleggen van een globale tijd in een heel inertiaalstelsel is dit op zijn minst onpraktisch omdat het een eeuwigheid zou duren om alle klokken te synchroniseren. Fundamenteel is het probleem dat daarmee de tijdmaat afhankelijk is van de lokale tijd in een ander inertiaal systeem. Conceptueel is dit slecht verenigbaar met het relativiteitsprincipe, dat stelt dat alle inertiaalsystemen in alle opzichten equivalent zijn. Dat betreft

in het bijzonder de definitie van een globale tijd.

Er moet dus een universele operationele procedure worden afgesproken die het mogelijk maakt, in principe met iedere gewenste precisie, twee klokken die op vaste plekken staan, zeg A en B, en ten opzichte van elkaar niet bewegen, gelijk te laten lopen. Deze procedure moet in ieder inertiaalstelsel op dezelfde wijze toepasbaar zijn en minimaal voldoen aan de volgende vereisten van consistentie [5]:

1. (Homogeniteit) als een klok (op plek) B gesynchroniseerd is met een klok A op een bepaald tijdstip, dan moet klok B gesynchroniseerd blijven op latere tijdstippen, verifieerbaar met de synchronisatieprocedure.
2. (Symmetrie) als een klok B gesynchroniseerd is met een klok A, dan is ook klok A gesynchroniseerd met klok B.
3. (Transitiviteit) als een klok A gesynchroniseerd is met een klok B en klok B met een klok C, dan zijn ook klokken A en C met elkaar gesynchroniseerd.

Deze vereisten gelden voor ieder paar klokken op willekeurige tijdstippen.

Het bestaan van een afspraak over gelijktijdigheid die aan al deze eisen voldoet is op voorhand geen fysieke vanzelfsprekendheid.

Einsteintijd

Om twee klokken die op vaste plekken staan in een inertiaalstelsel gelijk te laten lopen, wordt in theorie en praktijk de synchronisatieprocedure van Albert Einstein gevolgd. Men stuurt een lichtsignaal (of ander elektromagnetisch signaal) op tijdstip t_A van plek A naar plek B; het lichtsignaal wordt op tijdstip t_B instantaan teruggezonden naar A waar het op tijdstip $\bar{t}_A$ weer arriveert. De tijd t_B synchroon met t_A is dan per definitie:

$$t_B = t_A + \frac{1}{2}(\bar{t}_A - t_A). \quad (1)$$

Einstein veronderstelde in zijn artikel van 1905 – zonder een bewijs, dat later wel werd gegeven door Hermann Weyl [5] – dat dit voorschrift in overeenstemming is met de consistentie-eisen zoals hierboven geformuleerd, en dat men op deze wijze, zonder tegenstrijdigheden, klokken op willekeurige plekken A en B accuraat kan synchroniseren. De procedure definieert dan een globale tijdcoördinaat t in het gegeven inertiaalstelsel die Einsteintijd wordt genoemd, met

als tijdeenheid de seconde.

Er is een direct verband met de eenheid van lengte die sinds 1983 in het SI-stelsel is vastgelegd via de lichtseconde, dat wil zeggen de afstand die het licht aflegt in één seconde. In SI-eenheden is de meter gedefinieerd als de fractie $1/299.792.458$ van de lichtseconde. Dit betekent dat het tijdsverschil in (1) een afstand definieert

$$c(\bar{t}_A - t_A) = \overline{AB} + \overline{BA}. \quad (2)$$

Hierin is $c := 299.792.458$ de in 1983 vastgelegde lichtsnelheid. Dus formule 1 kan ook geschreven worden als

$$t_B = t_A + \overline{AB}/c, \quad (3)$$

met $\overline{AB} = \overline{BA}$ de (euclidische) afstand tussen A en B.

De synchronisatie-afpraak (3) is equivalent met het tweede postulaat van Einstein dat de lichtsnelheid een universele constante is in alle inertiaalstelsels: als klokken volgens de Einsteinprocedure worden gesynchroniseerd, dan is de snelheid van het licht in ieder inertiaalstelsel per definitie gelijk aan de constante c . Die gelijkheid is niet een hypothese die experimenteel getest kan worden. Einstein zei hierover: “it is in reality neither a supposition nor a hypothesis about the physical nature of light, but a stipulation which I can make of my own free will in order to arrive at a definition of simultaneity” [3]. Zonder context lijken deze veelgeciteerde woorden van Einstein te suggereren dat gelijktijdigheid een arbitraire afspraak is. Het lichtpostulaat van Einstein heeft echter een voorgedienis.

Poincaré-Einsteinconventie

In een artikel uit 1898 met de titel *La mesure du temps* [6] merkt Henri Poincaré op dat het onder astronomen gebruikelijk is om te veronderstellen dat de lichtsnelheid constant is in alle richtingen, maar dat dit postulaat nooit direct geverifieerd kan worden in een experiment. Het probleem is dat om de snelheid van het licht (of iedere andere snel-

heid) tussen twee plekken A en B te bepalen, men minimaal over twee klokken moet beschikken die op een of andere manier gesynchroniseerd zijn. Maar om twee klokken te kunnen synchroniseren met lichtsignalen moet wel eerst de lichtsnelheid bekend zijn. Dit fundamentele probleem werd al in 1898 onderkend door Poincaré die ook een oplossing zag: “The simultaneity of two events should be fixed in such a way that the natural laws become as simple as possible. In other words, all these rules, all these definitions are only the result of an implicit convention”.

Het is onduidelijk of Einstein bekend was met het werk van Poincaré. In ieder geval is zijn oplossing voor het synchronisatieprobleem het postulaat dat de lichtsnelheid constant is in alle richtingen, en dat dit geldt in alle inertiaalstelsels. In dat geval is de lichtsnelheid van A naar B hetzelfde als die van B naar A en gelijk aan de round-trip-lichtsnelheid (in vacuüm). Die snelheid is gemeten in talloze experimenten te beginnen met die van Fizeau (1849), Foucault (1862) en Michelson (1877). De onewaylichtsnelheid is onderdeel van de afspraak dat “by definition the ‘time’ required by light to travel from A to B equals the ‘time’ it requires to travel from B to A.” [2]. Zoals Poincaré al eerder betoogde, is dit een conventie.

Men kan proberen klokken te synchroniseren zonder uitwisseling van (licht)signalen, bijvoorbeeld door een draagbare klok te verplaatsen tussen de stationaire klokken in A en B om zo beide klokken gelijk te zetten, zoals hierboven besproken. De nauwkeurigheid van deze procedure is dan wel afhankelijk van de nauwkeurigheid van de draagbare klok. Bovendien impliceert een verplaatsing een snelheid en daarmee relativistische tijddilatatie. Weliswaar is aangetoond onder andere door Eddington [4], dat *slow clock synchronization* in principe overeenkomt met Einsteinijds, maar dit geldt alleen voor situaties waarin de relativistische effecten van tijddilatatie verwaarloosd kunnen worden.

Discussie

Het feit dat de synchronisatie van klokken verspreid over een inertiaalstelsel berust op een afspraak, heeft na 1905 aanleiding gegeven tot veel discussie. Als Einsteinijds niets anders is dan een afspraak, dan zouden ook andere afspraken in aanmerking kunnen komen. Ook het postulaat van een constante lichtsnelheid, en meer in het bijzonder het veronderstelde onderscheid tussen de round-trip- en de onewaylichtsnelheid, riep vragen op.

In deze discussie had Hans Reichenbach met zijn boek *The Philosophy of Space and Time* [7], oorspronkelijk in 1928 gepubliceerd in het Duits, een belangrijke stem. Het idee dat de lichtsnelheid, een natuurconstante, vastgelegd kon worden door een afspraak te maken, was echter niet alleen voor een filosoof als Reichenbach, maar ook voor menig fysicus een ongerijmdheid. In de overvloedige literatuur zijn in de loop der tijd diverse voorstellen gedaan hoe toch de onewaylichtsnelheid te meten zou zijn. Helaas, hoe ingenieus ook, geen enkel experiment is een onewayexperiment [8]. Onvermijdelijk zal ergens in de meetprocedure een beroep moeten worden gedaan op een synchronisatiemethode van klokken die op afstand van elkaar staan.

Hoewel tot nu toe al het experimentele bewijs de geldigheid van de relativiteitstheorie ondersteunt, kan het als denkoefening nuttig zijn te onderzoeken in hoeverre de simultaneïteitsdefinitie van Einstein uniek is. We beschouwen, als hierboven, weer een foton dat op tijdstip t_A van A naar B wordt gezonden en dan weer instantaan terug naar A waar het op tijdstip $\bar{t}_A$ arriveert. Welke gebeurtenis in A verklaren we nu simultaan met de aankomst op plek B? Volgens Reichenbach voldoet iedere tijd t_B , met als enige conditie dat t_B later is dan t_A en eerder dan $\bar{t}_A$:

$$t_B = t_A + \epsilon(\bar{t}_A - t_A). \quad (4)$$

In deze formule kan ϵ ieder positief reëel getal zijn kleiner dan 1, voor

alle plekken B. Volgens Reichenbach is Einstein-tijd niets anders dan een speciale Reichenbach-tijd met $\epsilon = 1/2$. Alleen afgaande op formule 4 lijkt deze bewering plausibel, maar de nieuwe definitie 4 heeft wel als onvermijdelijk gevolg dat ook de Lorentztransformaties ϵ -afhankelijk worden.

De consequenties van de Reichenbachdefinitie (4) zijn in de loop der tijd uitvoerig onderzocht, zie het overzichtsartikel [8]. De conclusie kan kort samengevat worden: alle resultaten die voortkomen uit de generalisatie (4), in combinatie met de bijbehorende ϵ -Lorentztransformaties, zijn één op één te vertalen naar resultaten van Einsteins relativiteitstheorie. Omdat kloksynchronisatie een conventie is, heeft de ϵ -parameter geen fysische betekenis, maar zou deze opgevat kunnen worden als een soort ijkparameter die verschillende synchronisatieconventies met elkaar verbindt [8]. Zoals we hierboven Poincaré al citeerden: “The simultaneity of two events should be fixed in such a way that the natural laws become as simple as possible”. De Poincaré-Einsteinconventie is eenvoudig de eenvoudigste.

Conclusie

De speciale relativiteitstheorie veronderstelt het relativiteitsprincipe (Einsteins eerste postulaat) en de volgende eigenschappen van ruimte en tijd [1]:

1. Het bestaan van inertiaalstelsels waarin een globale tijdcoördinaat is gedefinieerd;
2. Homogeniteit van de zo geconstrueerde vierdimensionale ruimtetijd; daaruit volgt lineariteit van de transformatieformules tussen inertiaalstelsels;
3. Isotropie van de daarin bevatte driedimensionale euclidische ruimte; dit betekent dat er geen voorkeursrichting is en dat voor iedere transformatie een omgekeerde transformatie bestaat die dezelfde vorm heeft.

Op grond van deze veronderstel-

“Het feit dat de synchronisatie van klokken verspreid over een inertiaalstelsel berust op een afspraak, heeft na 1905 aanleiding gegeven tot veel discussie.”

lingen hebben Wladimir von Ignatowsky en anderen [9] aangetoond dat de transformatieformules tussen inertiaalstelsels de vorm hebben van Lorentztransformaties met daarin een onbepaalde constante die de dimensie van snelheid in het kwadraat heeft. Daarmee lijkt het lichtpostulaat van Einstein overbodig [1]. Identificatie met de lichtsnelheid is echter een keuze [10]; deze keuze impliceert Einsteins lichtpostulaat dat de lichtsnelheid isotroop is. Wat in deze wiskundige afleidingen buiten beschouwing wordt gelaten is het fysisch relevante feit dat het begrip ‘tijd’ in een inertiaalstelsel een operationele definitie behoeft, zoals Einstein in zijn artikel van 1905 expliciet stipuleert. Einstein-tijd specificeert een eenduidige procedure voor de vaststelling van de globale tijdcoördinaat in inertiaalstelsels die consistent is met de gepostuleerde constante lichtsnelheid, én de veronderstelde homogeniteit en isotropie van ruimtetijd. Tijddilatatie-effecten bij het verval van hoogenergetische deeltjes en andere relativistische verschijnselen zijn direct terug te voeren op deze afspraak over tijdmeting. Het lichtpostulaat, met inbegrip van de Poincaré-Einsteinsynchronisatieconventie, is en blijft daarom een essentieel fundament van de relativiteitstheorie.

Dankwoord

De auteur is Leendert Suttorp erken-

telijk voor kritisch commentaar en een uitgebreide literatuurlijst over relativiteit, in het bijzonder de referentie naar het overzichtsartikel [8].

Chris van Weert is theoretisch natuurkundige en emeritus hoogleraar aan de Universiteit van Amsterdam.
c.g.vanweert2@contact.uva.nl

REFERENTIES

- 1 G. Koekoek, J-W. van Holten en U. Wyder, *Het pad naar de speciale relativiteitstheorie*, NTvN **88-02**, 14-19 (2022).
- 2 A. Einstein in: *The Principle of Relativity*, Dover Publications, 37-71 (1923).
- 3 A. Einstein, *Relativity*, University Paperbacks, p. 23 (1960).
- 4 A.S. Eddington, *The Mathematical Theory of Relativity*, Cambridge University Press (1924).
- 5 H. Weyl, *Space Time Matter*, Dover Publications (1952), gebaseerd op de Duitse editie van 1921; E. Minguzzi, *Simultaneity in special and general relativity*, arXiv:gr-qc/0506127v1, 1-9 (2005).
- 6 H. Poincaré, *La mesure du temps*, *Revue de Métaphysique et de Morale* **6**, 1 (1898); Engelse vertaling: <http://en.wikisource.org/wiki>.
- 7 H. Reichenbach, *The Philosophy of Space and Time*, Dover Publications (1958).
- 8 R. Anderson, I. Vetharaniam en G.E. Stedman, *Conventionality of synchronization, gauge dependence and test theories of relativity*, *Phys. Reports* **295**, 93-180 (1998).
- 9 W. A. von Ignatowsky, *Einige allgemeine Bemerkungen zum Relativitätsprinzip*, *Verh. Deutsch. Phys. Ges.* **12**, 788-796 (1910); V. Berzi en V. Gorini, *J. Math. Phys.* **10**, 1518-1524 (1969); P. Moylan, *Am. J. Phys.* **90**, 126-134 (2022).
- 10 H. van der Lek, *Lorentztransformatie zonder licht; een alternatieve aanpak*, NTvN **88-11**, 30-32 (2022).
- 11 Zoals geciteerd door A. Forsee in: *Albert Einstein Theoretical Physicist*, Macmillan, p.81 (1963); bijna alle geschriften van Albert Einstein zijn te vinden in de digitale bibliotheek van het Einstein Papers Project: <https://einsteinpapers.press.princeton.edu>.
- 12 Verder lezen: D. Dieks, *Time in Special Relativity*, in: *Springer Handbook of Spacetime*, A. Ashtekar en V. Petkov (Eds.), Springer-Verlag, 91-112 (2014).