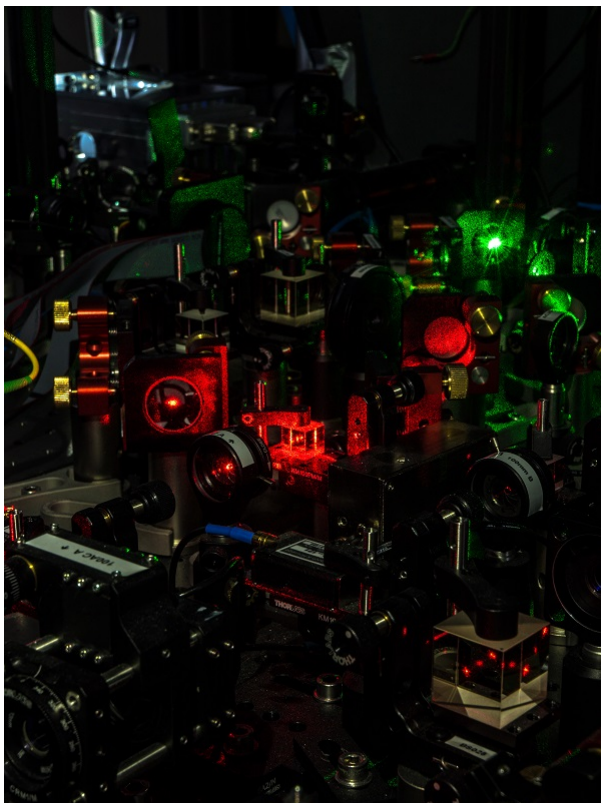


Einsteins ongelijk bewezen?

Het was vorige week met grote letters in de krant te lezen: [Einsteins ongelijk is bewezen](#). Delftse onderzoekers hebben een experiment uitgevoerd dat dit definitief aantoont. Maar waar had Einstein nu precies ongelijk in, en hoe is dat bewezen?

In dit artikel:

- [De relativiteitstheorie klopt nog gewoon!](#)
- [De EPR-paradox](#)
- [Bell-ongelijkheden](#)
- [Loopholes](#)
- [Het Delftse experiment](#)



Afbeelding 1. De meetopstelling. Een deel van de meetopstelling waarmee in Delft definitief Einsteins ongelijk

werd bewezen. Maar waarin had hij nu precies ongelijk? Foto: Frank Auperle.

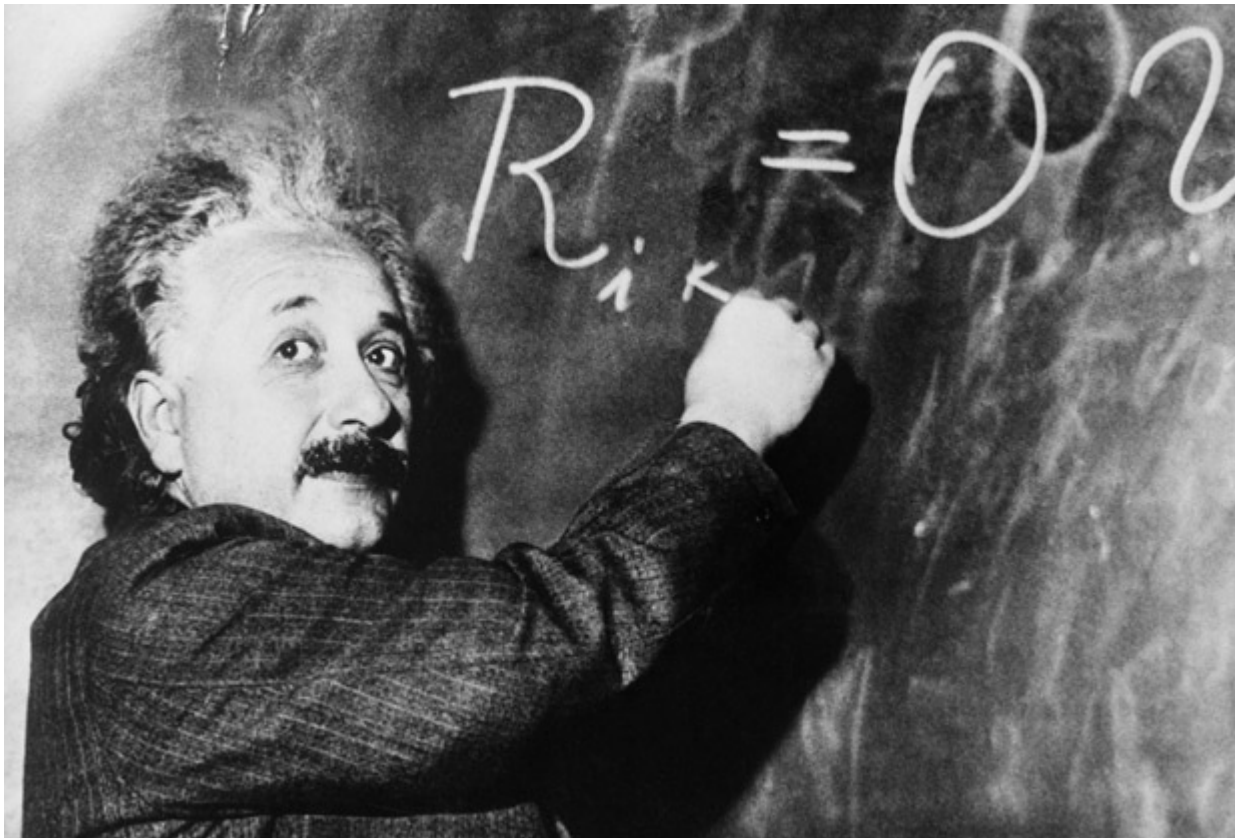
De relativiteitstheorie klopt nog gewoon!

Om een belangrijk misverstand maar direct uit de weg te ruimen: de relativiteitstheorie, Einsteins beroemdste ontdekking, staat ook na het Delftse experiment nog fier overeind.

Zoals misschien bekend (lees vooral ons [dossier over relativiteitstheorie](#) als dat niet het geval is) voorspelt de relativiteitstheorie de nodige tegenintuïtieve dingen. Zo kunnen we volgens die theorie niet sneller dan het licht reizen, gaan bewegende klokken iets langzamer lopen, worden bewegende meetlatten iets korter, enzovoort. Allemaal zaken die tegen onze dagelijkse ervaring indruisen, maar die experimenteel getest kunnen worden en die tot nu toe alle tests hebben doorstaan.

Het tegenintuïtieve van de relativiteitstheorie is in zekere zin begrijpelijk. Het gaat hier om effecten die pas een serieuze rol spelen zodra voorwerpen gaan bewegen met snelheden in de buurt van de lichtsnelheid, zo'n 300.000 kilometer per seconde. In ons dagelijks leven ervaren we zulke snelheden nooit, dus het is niet zo vreemd dat we geen intuïtie hebben voor wat er onder dergelijke omstandigheden gebeurt. Helaas zorgt dat gebrek aan intuïtie ervoor dat de voorspellingen van de relativiteitstheorie bij veel mensen een natuurlijke 'weerstand' oproepen - en dus is het niet zo vreemd dat we bij het lezen van de kreet "Einsteins ongelijk" in eerste instantie direct denken aan de relativiteitstheorie.

Hoewel misschien onbedoeld, zijn de krantenkoppen in die zin dus misleidend. Maar als het Delftse experiment niet over de relativiteitstheorie gaat, waar gaat het dan wel over?



Afbeelding 2. Albert Einstein.Einstein bedacht de speciale en de algemene relativiteitstheorie, maar heeft nog veel meer wetenschappelijke wapenfeiten op zijn naam staan. Eén daarvan is de zogeheten EPR-paradox.

[Naar boven](#)

De EPR-paradox

De experimenten in Delft zeggen vooral iets over die andere beroemde (en eveneens enigszins tegenintuïtieve) natuurkundige theorie: de quantummechanica. Ook voor die theorie geldt overigens dat er, voor wie alle details wil weten, elders op deze site een [uitgebreid dossier](#) is te vinden.

In de quantummechanica speelt het begrip *kans* een centrale rol in de beschrijving van elementaire deeltjes. Die deeltjes hoeven in de quantumwereld niet altijd in een toestand te zijn die overeenkomt met heel specifieke meetwaarden. In de klassieke natuurkunde is dat wel zo: een bal is op plaats 1, of op plaats 2, of op plaats 3, en met elk van die plaatsen komt een heel specifieke uitkomst voor de meting van de grootheid “positie” overeen.

Quantummechanisch kunnen we echter deeltjes hebben die in een zogeheten *superpositie* zijn: een deeltje kan bijvoorbeeld voor 50% op plaats 1, voor 30% op plaats 2, en voor 20%

op plaats 3 zijn.

Hetzelfde geldt voor *paren* van deeltjes, maar in dat geval is er nog een extra bijzonderheid: de kansen voor de ene helft van zo'n deeltjespaar kunnen gekoppeld zijn aan de kansen voor de andere helft van het paar. Als dat het geval is spreken we van *verstrengeling*. Voor een eenvoudig voorbeeld is de grootheid "positie" die we hierboven beschreven niet ideaal, dus laten we naar een andere grootheid kijken: de *spin* van deeltjes. Over het begrip 'spin' kunnen hele boeken vol worden geschreven, maar heel grofweg komt het erop neer dat elementaire deeltjes zoals het elektron op twee manieren rond kunnen draaien – grofweg 'linksom' en 'rechtsom'.

Voor een deeltjespaar zijn er dus in eerste instantie vier mogelijkheden: deeltje A kan linksom draaien en deeltje B ook; deeltje A kan linksom draaien en deeltje B rechtsom, enzovoort. Bovendien hebben we het hier over quantumdeeltjes, dus een paar kan ook in de toestand zijn waarin er 30% kans is op 'beide draaien linksom', 17% kans op 'A draait linksom, B draait rechtsom', enzovoort – zolang de vier kansen samen maar netjes optellen tot 100%.

Een verstrengelde toestand is nu een toestand waarin bijvoorbeeld alleen de toestanden 'A draait linksom, B draait rechtsom' en 'A draait rechtsom, B draait linksom' een bepaalde kans hebben – de andere twee kansen zijn 0. Dat houdt het volgende in: als ik alleen de spin van deeltje A meet, kan ik niet voorspellen wat de uitkomst zal zijn: er is een bepaalde kans op elk van de mogelijke meetwaarden. Hetzelfde geldt als ik alleen de spin van deeltje B meet. Maar zodra ik de spin van deeltje A heb gemeten kan ik met 100% zekerheid voorspellen welk antwoord ik voor B zal vinden! Vind ik bij A 'linksom', dan weet ik dat ik bij B 'rechtsom' zal vinden, en omgekeerd.



Afbeelding 3. Kansen. Quantumdeeltjes kunnen in een superpositie zijn, waarbij verschillende mogelijke meetuitkomsten elk een bepaalde kans hebben. Waar bij een dobbelsteen de kansen berusten op onze onwetendheid (in principe kunnen we de uitkomst van een bepaalde worp exact voorspellen) zijn in het quantumgeval de uitkomsten echt **onbepaald**, en de kansen fundamenteel. Foto: Wikipedia-gebruiker Diacritica.

In zekere zin bepaalt een meting aan A dus niet alleen iets over A, maar ook iets over B. Sterker nog: als we de quantumkansen serieus nemen *beïnvloedt* de meting aan deeltje A de toestand van deeltje B. Dit laatste is hetgene waar Einstein problemen mee had. Die beïnvloeding zou namelijk *ogenblikkelijk* moeten gebeuren, en in het bijzonder dus met een snelheid groter dan die van het licht van deeltje A op deeltje B moeten worden overgedragen. Dat laatste is met name een probleem als we deeltjes A en B voor de meting ver van elkaar verwijderen: dan verwachten we immers dat een signaal van A er enige tijd over zou doen voor het B bereikt – maar óók als we voordat zo'n fictief signaal aankomt deeltje B meten vinden we het juiste antwoord!

Einstein legde dit probleem uit in een beroemd artikel dat hij in 1935 samen met zijn collega's Boris Podolsky en Nathan Rosen schreef. Sindsdien staat het probleem dan ook

bekend als de *EPR-paradox*. De tegenwoordig algemeen geaccepteerde oplossing van de paradox is de volgende: hoewel een meting aan deeltje A deeltje B wel instantaan beïnvloed, kan er op deze manier geen *signaal* overgebracht worden. We kunnen immers niet vooraf bepalen wat de uitkomst van de meting aan deeltje A gaat worden – die uitkomst is volkomen willekeurig. De toestand van deeltje B verandert dus wel, maar als iemand een meting aan B verricht lijkt de uitkomst voor hem nog altijd volkomen willekeurig – tenzij de waarnemer bij A hem ook verteld heeft wat de uitkomst van *zijn* meting was. Dat laatste kan echter alleen met hooguit de lichtsnelheid gecommuniceerd worden!

Einstein was geen fan van deze verklaring, en hing een andere uitleg aan. Volgens hem was er sprake van zogeheten *verborgen variabelen*. De quantumkansen die we waarnemen, zijn in Einsteins model geen echte, fundamentele kansen. Die kansen zeggen alleen iets over onze *onwetendheid*. Ergens in de quantumdeeltjes zou een soort ‘programma’ opgeslagen zitten waarmee vooraf al bepaald zou kunnen worden welke uitkomst elk deeltje bij meting zou geven. De programma’s zouden dan bovendien zo zijn dat het programma van deeltje A ‘linksom’ geeft precies wanneer het programma van deeltje B ‘rechtsom’ geeft – en andersom.

Mocht het u na het lezen van al het bovenstaande flink duizelen, dan helpt het wellicht om onderstaande video te kijken, waarin dit alles nog eens op mooie grafische wijze wordt uitgelegd.

[Naar boven](#)

Bell-ongelijkheden

In bovenstaande video wordt ook een verrassend feit besproken: we kunnen *meten* of Einsteins verklaring juist is of niet! Dat doen we door de spins van de twee verstrengelde deeltjes niet in precies dezelfde richting te meten, maar in richtingen die iets van elkaar verschillen. De uitkomst voor deeltje A voorspelt dan niet langer exact wat de uitkomst voor deeltje B zal zijn, maar zegt nog wel iets over de *kans* om voor deeltje B ‘linksom’ of ‘rechtsom’ te vinden. En het mooie is: volgens Einsteins model van verborgen variabelen zijn die kansen net iets anders dan volgens de gewone quantumtheorie! Als we de meting dus maar vaak genoeg herhalen, kunnen we zo testen of Einsteins interpretatie juist was of niet.

Einstein zelf beseftte zich niet dat zijn model tot andere meetuitkomsten zou leiden dan de gewone quantumtheorie – dat zou pas in 1964 door John Bell worden aangetoond. Bell schreef zijn resultaat in de vorm van een aantal ongelijkheden: bij metingen zouden de frequenties van bepaalde uitkomsten *boven* een zekere grens liggen als de theorie van verborgen variabelen klopte, maar ruim onder die grens als de gewone quantumfysica klopte.



Afbeelding 4. John Bell.Foto: Queen's University Belfast.

[Naar boven](#)

Loopholes

Daarmee leek het dus eenvoudig om Einsteins gelijk of ongelijk aan te tonen: men hoefde alleen maar de spins van paren verstrengelde deeltjes een groot aantal malen onder verschillende hoeken te meten, en dan te tellen of de frequenties van combinaties als 'A linksom, B rechtsom' boven of onder de door Bell gevonden grenswaardes uitkwamen. Werd de ongelijkheid van Bell daarbij geschonden, dan kon Einstein het onmogelijk bij het rechte eind hebben.

Het technisch uitvoeren van zo'n experiment bleek echter nog niet zo eenvoudig. In 1972 werd door S. J. Freedman en J. F. Clauser voor het eerst een dergelijk experiment succesvol

uitgevoerd. Men vond inderdaad dat de Bell-ongelijkheid geschonden was (met andere woorden: dat Einsteins idee niet juist was), maar in het experiment uit 1972 zaten nog een drietal belangrijke 'loopholes':

1. Het verstrengelde deeltjespaar werd in het experiment niet ver genoeg uit elkaar gebracht om er zeker van te zijn dat 'communicatie' tussen de deeltjes onmogelijk was. Met andere woorden: het was in principe nog mogelijk dat het ene deeltje zijn meetuitkomst met de lichtsnelheid aan het andere deeltje doorgaf, en zo de meetuitkomst voor het andere deeltje bepaalde.
2. Om nog zekerder te zijn dat communicatie tussen de deeltjes geen invloed kan hebben, moeten eigenlijk ook de precieze richtingen waarin de spin gemeten wordt pas op het allerlaatste moment bepaald worden - anders zouden de deeltjes immers allang kunnen 'weten' welke meting ze kunnen verwachten, en die informatie aan elkaar doorspelen.
3. Metingen aan verstrengelde deeltjesparen zijn technisch erg lastig. In een praktische meting lukt het daarom zelden om elk verstrengeld deeltjespaar succesvol te meten. Meestal wordt maar een kleine fractie van de deeltjesparen succesvol gemeten; de andere metingen gaan om allerlei technische redenen mis. We vinden dus alleen dat de meetfrequenties in de daadwerkelijk gemeten gevallen de Bell-ongelijkheid schenden, maar het zou in theorie nog mogelijk zijn dat de niet gemeten gevallen hiervoor compenseren zodat de daadwerkelijke frequenties wel aan de Bell-ongelijkheid voldoen.

De eerste 'loophole' is verreweg de grootste: het doel van de metingen is immers om aan te tonen dat er invloed sneller dan het licht wordt uitgeoefend. Het is dus niet volledig overtuigend wanneer dit wordt 'aangetoond' in een experiment waarin gewone informatie nog wel voldoende tijd heeft om met minder dan de lichtsnelheid overgebracht te worden. De eerste die erin slaagde een experiment uit te voeren waarin deze loophole gedicht werd, was Alain Aspect, in 1982. Hij bracht het verstrengelde deeltjespaar enkele meters uit elkaar, en wist de metingen aan de deeltjes vervolgens zo snel te doen dat er tussen de metingen aan A en aan B niet met de lichtsnelheid informatie uitgewisseld kon worden.

Pas in 2001 lukte het de groep van M. Rowe om de derde loophole te dichten: er werd een experiment gedaan waarbij zoveel geslaagde metingen werden verricht dat kon worden aangetoond dat *alle* deeltjesparen (en niet alleen degene die daadwerkelijk tot een succesvolle meting leidden) de Bell-ongelijkheid schonden. Ook dit experiment leek dus

Einsteins ongelijk aan te tonen, maar dit experiment vond weer op erg kleine afstanden plaats zodat de eerste twee loopholes overbleven.



Afbeelding 5. De opstelling van Aspect. Met deze opstelling toonde Alain Aspect in 1982 aan dat informatie tussen verstrengelde deeltjes niet met een snelheid kleiner dan de lichtsnelheid uitgewisseld kon worden.

Foto: Groupe d'optique atomique / LCFIO.

[Naar boven](#)

Het Delftse experiment

In Delft is het nu uiteindelijk gelukt om een experiment te doen waarin alle drie de loopholes *tegelijk* gedicht konden worden. De verstrengelde deeltjes werden erg ver uit elkaar gebracht (maar liefst zo'n 1,3 kilometer), waardoor er voldoende tijd was om de meetrichtingen op beide locaties te bepalen en de metingen te doen *voordat* een lichtsignaal van deeltje A deeltje B bereikt kon hebben. Bovendien zijn de metingen met hoge precisie gedaan – dus met een zeer klein aantal 'missers' – zodat ook aangetoond kon worden dat *alle* geproduceerde paren (en niet alleen de succesvol gemeten paren) de Bell-ongelijkheid schenden.

Kortom: er lijkt nu onomstotelijk bewezen dat Einsteins verklaring in termen van verborgen variabelen niet juist is, en dat we wel degelijk de fundamentele quantumkansen nodig hebben om de quantumwereld te beschrijven. Die uitkomst op zich zal weinig onderzoekers verbazen, maar het is in de fysica altijd belangrijk om volledig zeker te zijn van een gegeven resultaat – en die zekerheid heeft het Delftse experiment nu geleverd.

Daarmee is dus nóch aan de relativiteitstheorie, nóch aan de quantumfysica iets veranderd. Wat wel bewezen is, is dat Einsteins ideeën over hoe de twee theorieën samengaan niet juist waren. Dát is Einsteins 'ongelijk' dat nu bewezen is. Aangezien het gehele proces sinds het verschijnen van het EPR-artikel zo'n 80 jaar geduurd heeft, moge het duidelijk zijn dat het hier allesbehalve om een simpele blunder gaat. Zoals het een echt genie betaamt, zit zelfs achter Einsteins ongelijk enorm fascinerende fysica!

[Naar boven](#)