

Quantummechanica

Bohr, Heisenberg en anderen hebben de quantummechanica uitgewerkt in de zogenaamde *Kopenhaagse interpretatie*. Hierin speelt de waarnemer een belangrijke rol. Als hij kiest voor een experiment met golven, dan vindt hij ook golven (bijvoorbeeld interferentiepatronen); maar als hij kiest voor een experiment met deeltjes, dan vindt hij deeltjes (bijvoorbeeld foto-elektrische effecten). Het golfmodel en het deeltjesmodel zijn *complementair*. Niemand heeft tot dusver een experiment kunnen verzinnen waarin we beide aspecten tegelijk tegenkomen. Sterker nog: de quantummechanica vertelt ons dat zo'n experiment niet bestaat. Volgens Bohr maakt de meekijkende waarnemer de golf functie kapot. In deze interpretatie zijn uitspraken over elektronen die in banen rond een kern draaien, zinloos. Er is geen natuurkundige reden waarom plaats, impuls, ... van een elektron zouden bestaan. Er is zelfs geen bewijs dat een elektron zelf tussen twee metingen wel bestaat.

De waarnemer verstoort de meting

Uit experimenten blijkt dat een waarnemer bij een meting een belangrijke rol speelt. Zo werden Beïonen 256 ms lang beschoten met fotonen. Na afloop waren alle atomen aangeslagen, van niveau 1 naar niveau 2. Maar het aantal dat was aangeslagen, hing ervan af hoe vaak je intussen had gekeken! Na 256 ms was 100% aangeslagen als je niet intussen had gekeken. Keek je na 128 ms dan was de kans $\frac{1}{2}$ voor niveau 1 en $\frac{1}{2}$ voor niveau 2. Keek je 4 keer, dus iedere 64 ms, dan was na afloop maar 33% aangeslagen. Ra, ra, hoe kan dat?

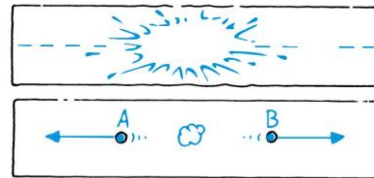
Kijk je vroeg in de tijdsduur van 256 ms, dus als de kans op niveau 2 nog klein is, dan *dwing* je een ion te kiezen voor 1 of 2 en dat terwijl de kans op 1 op dat moment groot is. Het is alsof je naar het beslag in de oven kijkt door de deur te openen; hoe vaker je kijkt, hoe kleiner de kans dat het een cake wordt.

Is de maan er als je niet kijkt?

Einstein vatte het zo samen: het is net alsof de maan er niet is als je niet kijkt. Tegen deze consequenties hebben Planck, Einstein, De Broglie en Schrödinger zich altijd verzet. Volgens hen moesten elektronen en andere deeltjes toch op een of andere manier reëel zijn. Heisenberg en Bohr wezen er met nadruk op dat de problemen voortkomen uit de taal die wij gebruiken. Daarin gebruiken we woorden uit het dagelijks leven zoals plaats en impuls. Tevergeefs proberen we atomaire deeltjes te zien als wat klein uitgevallen fietskogeltjes. Voor quantumverschijnselen zijn er geen analogieën in de ons bekende wereld.

Het EPR-experiment

In 1935 lanceerde Einstein samen met Podolsky en Rosen zijn laatste aanval op de Kopenhaagse interpretatie. Zij verzinnen een gedachtenexperiment (het EPR-experiment) om de onzekerheidsrelatie te slim af te zijn. Ze wilden aantonen dat deeltjes hun eigenschappen als plaats en impuls van zichzelf al hebben en dat ze die niet pas tijdens het meten krijgen. Want daar komt de Kopenhaagse interpretatie op neer. Hun redenering was de volgende: 'Stel twee atomaire deeltjes vliegen uit elkaar; $\Sigma \vec{p} = \vec{0}$. Meet daarna tegelijkertijd de plaats van A en de impuls van B. Met de wet van behoud van impuls is de impuls van A te vinden zonder A te storen. Maar dan zijn tegelijk de plaats en de impuls van A bekend en dat is in strijd met de onzekerheidsrelatie. De quantummechanica is dus geen complete theorie.'



Dit experiment gaat uit van twee veronderstellingen:

- Als A gemeten wordt, kan het B niet waarschuwen want dat seintje zou sneller dan het licht gaan.
- Ook als je de impuls van A niet meet, mag je er van uitgaan dat de impuls van A wel bestaat. (De maan is er, ook als je niet kijkt.)

In 1960 stelde Bell een formule op waardoor een experimentele test mogelijk werd en in 1972 was de techniek zover, dat het experiment uitgevoerd kon worden. Daarbij bleek dat Einstein ongelijk had. De consequenties worden nog steeds bestudeerd. Volgens een experiment uit 1998 zijn de twee deeltjes 'verknoopt' en staan ze in een soort telepathisch contact, waarbij ze sneller dan het licht informatie uitwisselen. Deze *verstrengeling* doet de een onmiddellijk reageren als de ander verandert, 'non locale overdracht'. Die werking op afstand volgens de quantummechanica is in strijd met de speciale relativiteitstheorie. De twee theorieën zijn onverenigbaar. Eén ding is zeker, Bohr had gelijk met zijn uitspraak: 'Wie niet geschokt is door de quantummechanica, heeft er niets van begrepen.'

De schrödingervergelijking

Schrödingers eerste gedachte bij de stelling van De Broglie was: ‘onzin’. Maar toen hij in 1925 merkte dat Einstein De Broglie steunde, zette dat hem aan het denken. Lichtstralen zijn een benadering voor lichtgolven, de geometrische optica is een benadering voor de golfoptica. Licht is te beschrijven als een elektromagnetische golf met een elektrische en een magnetische component, maar soms ook met fotonen, denk aan het foto-elektrische effect. Omgekeerd had De Broglie dan misschien gelijk en zou je ook een deeltje als een elektron door een golf kunnen beschrijven, een materieegolf met $\lambda = h/p$. De vergelijking die Schrödinger opstelde, is ingewikkeld en niet uit andere wetten af te leiden, het was een probeersel en had tot doel voorspellingen mogelijk te maken. Als die zouden kloppen met de metingen, wist hij dat hij op de goede weg zat.

Hoe beschrijf je een elektron in een H-atom met constante energie: $E = E_k + E_p$? Sterk vereenvoudigd was de gedachtengang van Schrödinger als volgt: voor een lopende golf geldt in het algemeen:

$$\psi(x, t) = A \sin(2\pi t/T + 2\pi x/\lambda)$$

Hierbij is t uitgedrukt in zijn natuurlijke eenheid T , de trillingstijd en x in zijn natuurlijke eenheid λ , de golflengte.

Met $\omega = 2\pi/T$ en $k = 2\pi/\lambda$ kun je dit iets korter noteren:

$$\psi(x, t) = A \sin(\omega t \pm kx)$$

Stationaire oplossingen

Voorlopig is het onduidelijk wat die ‘golf functie’ ψ voorstelt. Die ψ moet in ieder geval het elektron beschrijven en dus een grote waarde hebben in de buurt van het elektron en vrijwel nul zijn op grotere afstanden. Dat is op te lossen door niet één sinus te nemen maar een heleboel sinussen te combineren, zodat dat er een ‘golfpakketje’ ontstaat.

We zijn alleen geïnteresseerd in situaties waarbij het elektron alsmat dezelfde beweging uitvoert, zoals de rondjes om de kern in het H-atom. Bij een snaarinstrument zou je zeggen: we zoeken naar staande golven.

Het tijdafhankelijke deel ωt in de vergelijking doet er dan niet toe, we zoeken naar stationaire oplossingen en laten de term met ωt weg:

$$\psi(x) = A \sin(kx)$$

Differentieer ψ twee keer naar de plaats x en je vindt:

$$\psi'(x) = Ak \cos(kx)$$

$$\psi''(x) = -Ak^2 \sin(kx) \text{ dus } \psi'' = -k^2 \cdot \psi$$

$$\lambda = h/p \text{ en } k = 2\pi/\lambda \text{ dus } k = 2\pi p/h \Rightarrow$$

$$\psi'' + (2\pi p/h)^2 \cdot \psi = 0$$

De totale energie E is de kinetische energie plus de potentiële energie:

$$E = p^2/2m + E_p.$$

Vul p in en je vindt de golf-vergelijking voor het elektron gevangen in het H-atom:

$$\psi'' + \frac{8\pi^2 m}{h^2} (E - E_p) \psi = 0$$

Deze ‘golfvergelijking’ zou de stationaire toestanden van een H-atom moeten beschrijven.

Klopt de theorie?

Wat moet je voor E invullen als je oplossingen (eigenwaarden) zoekt van deze vergelijking? Schrödinger gebruikte de uitdrukking voor de potentiële energie van het H-atom en min of meer tot zijn verbazing vond hij precies de discrete energieniveaus die volgden uit de theorie van Bohr! Namelijk:

$$E_H = -13,6/n^2 \text{ (in eV)}$$

Een groot succes dus voor zijn ‘probeersel’.

Wat stelt ψ voor?

ψ is een onmeetbare grootheid. Wat kun je er dan mee? Wel kun je eisen dat ψ en ψ' continu zijn. Ook is aan de golfvergelijking te zien dat er géén golf is als de potentiële energieberg oneindig hoog is; met andere woorden: $\psi = 0$ als $E_p = \infty$.

Born kwam met het voorstel de golf functie ψ als volgt te interpreteren: $\psi^2 dV$ is de kans het deeltje in een volume dV te vinden. ψ stelt dus een *waarschijnlijkheidsgolf* voor. De ‘quantum-natuurkunde’ voorspelt niet wáár een deeltje is, maar geeft alleen de kans aan het deeltje aan te treffen.

Deze interpretatie zinde Einstein niet. Een bekende uitspraak van hem hierover is:

Der Herr Gott würfelt nicht. God dobbelt niet. En ook: I look upon quantum mechanics with admiration and suspicion.

Ook Schrödinger had er moeite mee dat de theorie weliswaar perfect voorspelde – zij het in de vorm van waarschijnlijkheden – maar voor afzonderlijke deeltjes vaag bleef. Hij had er zelfs spijt van dat hij de golfmechanica op poten had gezet: *I don't like it and I'm sorry that I ever had anything to do with it.*

De jacht op het Higgs boson

Soms lopen de theoretici in de natuurkunde voorop en proberen de experimentatoren hun ideeën onderuit te halen. Soms is het andersom en vinden ze een deeltje dat niet in de theorie past. Zo voorspelde Yukawa een ‘pion’, maar kreeg een ‘muon’. Rabi riep toen wanhopig uit: *Who ordered that?*

In 1960 ontstond orde in de chaos.

Het Standaardmodel rangschikte de elementaire deeltjes, de bosonen (wisselwerkingsdeeltjes of kracht-dragers) en de samengestelde deeltjes. Zie tabel 26A.

‘Gewone’ materie bestaat uit de vier deeltjes van de eerste generatie.

Er zijn vier fundamentele krachten en dus ook vier soorten bosonen: de sterke kracht werkt via g , het gluon; de zwakke kracht via W - en Z -deeltjes, de elektromagnetische kracht via het foton γ , en de gravitatiekracht via het graviton G . Het laatste is nog niet gevonden. De eerste drie krachtsoorten passen in het Standaardmodel; de laatste niet. De theorie wordt dan wel de theorie van bijna alles genoemd, maar de theorie van driekwart klinkt logischer.

Er was wel een probleem, de bosonen mochten in de theorie geen massa hebben. Veltman en 't Hooft wisten het Standaardmodel te integreren met hun *gauge theory* (spreek uit als gage, dus zonder u), een ijktheorie, een theorie waarbij je zelf het nulpunt kunt kiezen. Toen kon bijvoorbeeld de massa van het zwaarste quark, het topquark, voorspeld worden en dat bleek precies te kloppen. Wel liet Higgs in 1964 zien dat er nóg een boson nodig was en dat dat de bron van massa zou moeten zijn. Het graviton (G) is de kracht-drager; het Higgs boson (H) is de massagever; het veroorzaakt een achtergrondveld en maakt aanpak door het graviton mogelijk, zeg maar een sponsor.

Het Higgs boson is als een suiker-kristalletje op de schaal met pingpongballen in het filmpje op YouTube: *Higgs boson: science explained using sugar and ping-pong balls*.

Lederman schreef een boek over het ongrijpbare H -deeltje en wilde als titel: het *Goddamn particle* omdat het na 50 jaar nog steeds niet gevonden was, maar dat vond de uitgever niet goed. Sommigen spreken liever van het dog-particle dog = -god.

Maxwell ving in 1865 licht, elektriciteit en magnetisme onder één hoedje: het elektromagnetische krachtveld: het EM-veld. Hij ‘unificeerde’ deze drie theorieën. Ruim een eeuw later bleek ook de zwakke kracht verenigbaar met het EM-veld als tenminste de energie hoog genoeg is (meer dan 100 GeV) zoals in versnellers. Er zijn aanwijzingen dat de sterke kracht relatief zwak wordt bij heel hoge energieën. En als ook de

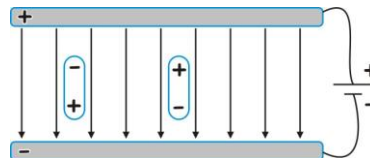
zwaartekracht bij nog hogere energieën zijn eigen karakter zou verliezen, zouden alle krachten samen kunnen vallen tot één superkracht.

Terug in de tijd

De theoretici gingen in gedachten terug naar de Oerknal en wel naar 10^{-34} s erna. Stel dat deeltjes tot dat moment géén massa hadden en dus bewogen met de lichtsnelheid. Vlak na de oerknal was er maar één krachtsoort, we zeggen nu: het veld was symmetrisch en alle deeltjes waren massaloos. Er was toen één krachtsoort, een superkracht.

Maar het heelal koelde af en bij een zekere temperatuur ontstond een krachtveld met een bijbehorend boson en wel overal in het heelal: het Higgs veld en het Higgs boson. Dit veld oefende krachten uit op de deeltjes, gaf ze traagheid en dat had hetzelfde effect als de deeltjes massa geven. Het ene deeltje meer dan het ander, het topquark bijvoorbeeld, werd zwaar gehinderd: het is 58000 keer zo zwaar als het upquark. Dit doet denken aan de ether waarvan men ooit dacht dat die overal in het heelal aanwezig moest zijn omdat licht zich toch niet in het niets kon voortplanten. Maar juist de fotonen hebben geen last van het Higgs veld.

Hoe kan een veld ervoor zorgen dat deeltjes massa krijgen? Stel dat twee watermoleculen in een elektrisch veld evenwijdig aan de veldlijnen zijn georiënteerd; het ene staat al goed, het andere moet nog omklappen.

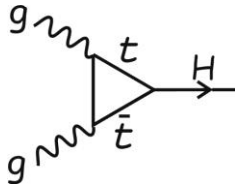


Normaal hebben die twee moleculen natuurlijk dezelfde massa, nu echter niet want degene die nog om moet klappen, de rechter, heeft méér (potentiële) energie. Maar energie is massa. Dat molecuul heeft dus door de aanwezigheid van het veld meer massa gekregen.

Sommige deeltjes waren niet tot wisselwerking te bewegen, bleven massaloos en bleven dus ook met de lichtsnelheid bewegen, zoals het foton. Bij lage temperatuur ontstaat kans op een verstoring van de symmetrie en zo zouden de vier fundamentele krachten tijdens de afkoeling van het heelal ook ontstaan kunnen zijn.

Hoe maak je Higgs bosonen?

De kans dat een elektron en een positron na botsing een Higgs boson vormen is klein. Hun massa's zijn te gering. Je kunt beter uitgaan van topquarks, die zijn $3,5 \cdot 10^5$ keer zo zwaar, bijna net zo zwaar als een goudatoom. Topquarks ontstaan als gluonen met elkaar in botsing komen. En die gluonen zitten in protonen. Daarom botsen in de LHC (Large Hadron Collider) in CERN twee bundels protonen met ieder 3,5 TeV. De energie komt overeen met die van 10^{-12} s na de Oerknal. Het proces wordt zó voorgesteld:



De kans op een Higgs deeltje bij botsing is kleiner dan 1 op een miljard. Je moet dus gemiddeld een miljard keer botsen om één keer het deeltje te vinden. In de LHC vonden $30 \cdot 10^6$ botsingen per seconde plaats.

De theorie voorspelt niet de massa van H zelf, maar wel het gebied van mogelijke massa's. Door andere experimenten was de massaband al eerder ingeperkt tot 115 – 135 GeV.

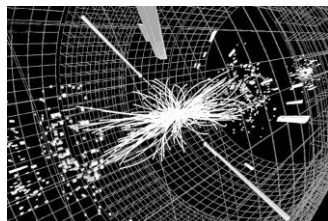
Deeltjes hebben last van het Higgs veld; dat is het wat hen afremt. Het is als in de pauze bij een concert. De meeste mensen kunnen ongehinderd doorlopen naar de bar; dat zijn lichtgewicht. Maar komt er een popster binnen, dan klampt iedereen hem aan. Zo'n zwaargewicht komt dus nauwelijks vooruit.

H is instabiel

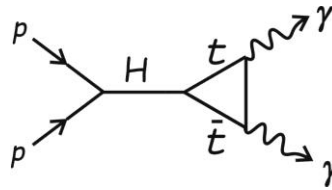
Het Higgs veld zelf is niet zichtbaar te maken, terwijl het overal in het universum aanwezig is. Daarom werd gezocht naar het deeltje dat het veld draagt, het wisselwerkingsdeeltje, het Higgs boson.

Het Standaardmodel voorspelt de zwaartekracht dan wel niet, het voorspelt wel uiterst nauwkeurig de manier waarop de massagever, het H-deeltje, vervalt en ook wat de kans daarop is.

Als dat gebeurt volgens $H \rightarrow \gamma, \gamma$ zoals hier, dan is dat eenvoudig te detecteren, want die reactie levert relatief weinig vervalproducten op.



Overigens kan H niet direct in twee gamma's vervallen, want die hebben geen massa. H vervalt eerst in twee topquarks met niet eens de goede massa – maar dat mag even van Heisenberg – en dan pas in twee gamma's.

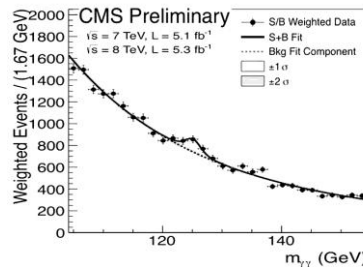
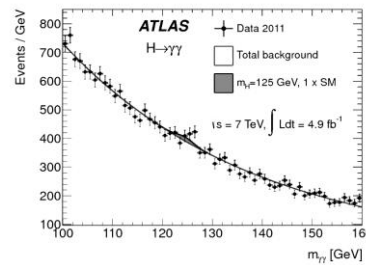


In de detectoren meet je ook niet eens het Higgs deeltje zelf, maar de vervalproducten, als een soort *smoking gun*. Je moet de massa én de energie van de vervalproducten terugrekenen om de massa van H te vinden.

Eindelijk

Na verzamelen en analyseren van $500 \cdot 10^{12}$ botsingen in het verwachte massagebied, groeide langzaam een piekje in de grafieken. Bleef het groeien of niet? Groeit het, dan is het misschien H. Groeit het niet, dan is het ruis.

ATLAS en CMS, de twee enorme, onafhankelijke detectoren, maten praktisch hetzelfde.



Ze kwamen op $m = 125,3 \pm 0,6$ GeV. De massa van het Higgs boson is daarmee 134 keer zo groot als de massa van een proton.

Op 4 juli 2012 durfden ze in Genève te melden: *We've got him.*

H is zeer instabiel en vervalt dus vrijwel direct, het leeft zo'n 10^{-22} s. De kans op bijvoorbeeld die twee gamma's kan precies berekend worden (0,1%) en nu al is gebleken dat H te snel vervalt, alsof er een tweede mogelijkheid is om in twee gamma's te vervallen.

Zoals zo vaak volgt na een oplossing een nieuwe vraag.

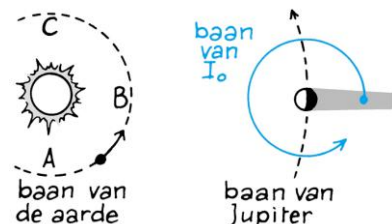
De snelheid van het licht

Licht plant zich zó snel voort, dat lang werd gedacht dat de lichtsnelheid oneindig groot zou zijn. Dan zou een gebeurtenis op aarde overal elders in het heelal op *hetzelfde* moment te zien zijn.

Galilei betwijfelde dat, maar zijn proeven waren op geen stukken na nauwkeurig genoeg om de eindigheid te bewijzen. Hij stuurde een lichtflits naar een assistent, die een tweede flits terug moest sturen als hij de eerste zag. Galilei mat de tijd tussen het wegzenden van zijn flits en de aankomst van de tweede. Hij vond een tijdsduur nul als hij rekening hield met de reactietijden van zijn assistent en hemzelf.

De metingen van Römer

Aan het eind van de 17e eeuw kon Römer aantonen dat de lichtsnelheid een eindige waarde heeft. In die tijd bestonden er nog geen betrouwbare scheepsklokken en waren er grote prijzen uitgelooft voor een goed ontwerp. Römer hoopte dat de maan Io van Jupiter hem een nauwkeurige ‘klok’ zou bezorgen. Hij noteerde lange tijd op welke tijdstippen hij Io uit de schaduw van Jupiter zag komen. Als de aarde bij A, B en C stond, vond hij echter verschillende omlooptijden. Het ontwerp voor een klok ging dus niet door.



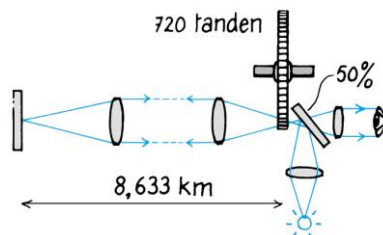
Je kunt de onregelmatige omlooptijd van Io met het dopplereffect verklaren. Als de aarde bij A is, naderen we de bron (Io) en lijkt de omlooptijd kleiner; bij B is de waargenomen periode ‘normaal’ en bij C verwijderen we ons van de bron en lijkt die trager te draaien.

Op grond van zijn waarnemingen kwam Römer tot 200000 km/s. Hooke vond zo’n hoge snelheid absurder dan een oneindig grote snelheid; hij bestreed Römer dan ook fel. Newton en Huygens accepteerden de conclusies van Römer. Zo schreef Newton in zijn *Opticks* dat het licht 7 à 8 minuten nodig heeft om van de zon naar de aarde te gaan; dat komt neer op ongeveer 330000 km/s.

De proeven van Fizeau en Foucault

In de 19^e eeuw slaagde Fizeau erin de lichtsnelheid met behulp van aardse afstanden te meten. Hij gebruikte een draaiend tandwiel.

Het licht vertrok tussen twee tanden naar een ver verwijderde spiegel, weerkaatste daar en werd bij zeker toerental geblokkeerd door een tand. Werde dat toerental verdubbeld, dan kon de lichtstraal weer passeren. Zo vond hij $3,13 \cdot 10^8$ m/s.

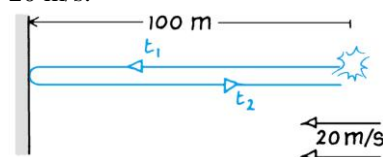


Een paar jaar later bracht Foucault de afstand terug tot een paar meter door een draaiende spiegel te gebruiken.

Toen kon ook de lichtsnelheid in water worden bepaald. Huygens kreeg gelijk: in water is de snelheid van het licht kleiner dan in lucht. De nauwkeurigheid van Foucault was ± 500 km/s. In 1926 verbeterde Michelson dat tot ± 4 km/s, onder andere door een afstand van 65 km tot op 5 cm nauwkeurig te bepalen. Nu is de nauwkeurigheid beter dan 1 m/s en is de lichtsnelheid een van de standaardeenheden: exact 299792458 m/s.

De lichtsnelheid en de ether

Als licht zich door ether zou voortplanten, zoals geluid door lucht, dan zou je een ‘etherwind’ moeten kunnen aantonen. Met wind mee heeft geluid een grotere snelheid dan met wind tegen. Stel je produceert een knal op 100 m van een muur; $v_{\text{geluid}} = 343$ m/s en er staat een storm van 20 m/s.



Dan heeft het geluid voor de heen- en terugweg nodig:

$$t_1 + t_2 = \frac{100}{363} + \frac{100}{323} = 0,585 \text{ s}$$

Zonder storm is dat 0,583 s.

Michelson en Morley probeerden in 1880 aan te tonen dat de aarde met minstens 30 m/s door de ether raast (dat is de snelheid van de aarde om de zon). Hoewel de nauwkeurigheid groot genoeg was om die snelheid aan te tonen, vonden ze géén effect. Einstein concludeerde dat de ether niet bestaat en dat het licht in vacuüm altijd dezelfde snelheid heeft, in welke richting je ook meet.