

Is energie behouden?

De grofweg duizend artikelen die je op de Quantum Universe-website kunt vinden hebben één ding gemeen: de redactie heeft bedacht waar ze over gaan. Nu wilden we wel eens weten: waar willen onze lezers eigenlijk meer over horen? Vandaar de nieuwe rubriek: “Vraag het een natuurkundige”. In de eerste editie beginnen wij met de vraag van lezer Elz: *hoe weten we dat energie behouden blijft?*



Een Newtonpendel. Bij de Newtonpendel speelt zowel behoud van energie als behoud van momentum een rol. Afbeelding: [Wikimedia Commons](#).

De wet van energiebehoud: iedereen die op school natuurkunde leert, komt ermee in aanraking. Energie kan worden omgezet van de ene vorm in de andere, maar de totale hoeveelheid energie verandert nooit. Maar *waarom* is dat zo? Dit is een uitstekende vraag, en er zijn een aantal mogelijke antwoorden. In het kort: omdat we energie *definiëren* als “dat wat behouden blijft in de loop van de tijd”! Dit lijkt natuurlijk een vrij flauw en circulair

antwoord, maar is wat mij betreft wel het meest fundamentele antwoord. Het is ook het typische antwoord dat een theoretisch fysicus je zal geven. Het komt namelijk voort uit een wiskundige stelling: de stelling van Noether. Overigens waren ook vóór Noethers stelling vragen over energiebehoud in de natuurkunde uiteraard van groot belang, bijvoorbeeld in de thermodynamica. Dat wordt misschien wel het best geïllustreerd door de eeuwige zoektocht naar een *perpetuum mobile*, zoals ook besproken in [een recent artikel van Jort de Groot](#).

Noethers stelling is met gemak een van de diepste inzichten uit de geschiedenis van de moderne wetenschap, en is alom aanwezig in de theoretische natuurkunde. Het inzicht transformeerde hoe we naar de natuurkunde kijken, en is grotendeels verantwoordelijk voor de obsessie van natuurkundigen met symmetrieën, die ik al eerder besprak [in dit artikel](#). ([Hier](#) vind je ook een recent artikel over het leven van Emmy Noether.) De stelling zegt dat elke “continue symmetrie” van een systeem de aanwezigheid van een behouden grootheid impliceert. Een voorbeeld van een continue symmetrie van een systeem is dat het systeem niet verandert onder rotaties – denk aan een cirkel. “Continu” betekent hier dat je de rotatie zo klein of groot kunt maken als je wilt – vergelijk het met de *discrete* rotatiesymmetrie van bijvoorbeeld een vierkant. Een andere continue symmetrie wordt gevormd door verplaatsingen in de ruimte: een experiment geeft hetzelfde resultaat, of je het nu in Nederland of in Tokyo uitvoert. Deze laatste symmetrie impliceert, als we Noethers stelling toepassen, [dat impuls behouden is](#). Welke symmetrie correspondeert met het behoud van energie? Symmetrie in de tijd!

Symmetrie in de tijd impliceert dat de uitkomst als jij vandaag een experiment uitvoert, en exact hetzelfde experiment over 50 jaar, hetzelfde zal zijn, oftewel: dat de wetten van de natuur onveranderlijk in de tijd zijn. Je zou kunnen zeggen dat elke succesvolle replicatie van een experiment bewijs hiervoor is, of omgekeerd dat afwezigheid van tijdsymmetrie een groot gevaar zou impliceren voor de repliceerbaarheid van experimenten en dus voor de wetenschappelijke methode.

Noethers stelling neemt wel aan dat het systeem dat je bestudeert het [principe van stationaire \(of: minimale\) actie](#) volgt. Dit houdt in dat een bepaalde grootheid, de actie, niet verandert onder heel kleine variaties van de parameters van het systeem. De actie is daarom geminimaliseerd (of zit in een zogenaamd extremum). Een praktische uitwerking van het principe van stationaire actie is bijvoorbeeld het principe van Fermat, dat zegt dat licht altijd

het snelste pad tussen twee punten doorkruist, zoals ik laatst al [in een artikel](#) besprak. Het principe is echter zeer algemeen, en vormt de basis voor zo'n beetje alle fundamentele natuurkunde.

Energie wordt dus *gedefinieerd* als de bij tijdsymmetrie behorende behouden grootte. Het is echter niet in het algemeen waar dat systemen tijdsonafhankelijk zijn, oftewel: tijdsymmetrie hebben. Vanwege de algemene relativiteitstheorie bijvoorbeeld, is er niet altijd tijdsymmetrie, omdat de [metriek](#), die de buiging van de ruimtetijd codeert, niet altijd tijdsonafhankelijk is. Hierdoor kunnen experimenten op dit soort achtergronden in het algemeen op verschillende tijden verschillende antwoorden geven. Een voorbeeld van een metriek die niet tijdsonafhankelijk is, is die van ons eigen universum: het universum dilt uit, en doet dat steeds sneller. Specifieker; ons universum wordt bij goede benadering beschreven door wat een [Robertson-Walkermetriek](#) genoemd wordt, en die is niet tijdsonafhankelijk.

Betekent dat dat energie niet behouden is in ons universum? Ja en nee. Zoals ik aan het begin zei: energie definiëren we als dat wat behouden blijft in de loop van de tijd. Een meer gangbaar antwoord is dan ook dat je in de algemene relativiteitstheorie niet altijd een zinnige *definitie* hebt van wat energie precies is, en equivalent daaraan dat er geen zinnige definitie van *tijd* is. In de praktijk is echter voor de meeste experimenten de kromming van de ruimtetijd van verwaarloosbaar belang. Voor alle experimenten in deeltjesfysica, of in vastestoffenleer, wordt bijvoorbeeld aangenomen dat de ruimtetijd vlak is: die heeft dan een zogenaamde [Minkowski-metriek](#). Deze metriek is wél tijdsonafhankelijk, en er is dus ook sprake van een degelijke definitie van energie, die dan ook behouden is.

Wat betreft vragen op de schaal van ons universum: de afwezigheid van een goede definitie van energie is iets waar we rekening mee houden, en wat zeker tot extra complicaties kan leiden. Het is bijvoorbeeld een van de redenen dat een [holografische theorie](#) in een [de Sitterruimte](#) lastiger te construeren is dan in de wiskundig elegantere, maar minder fysische, anti-de Sitterruimte, en één belangrijke reden waarom het überhaupt lastig is om [quantumveldentheorie](#) te gebruiken in zo'n de Sitterruimte. Ook de de Sitterruimte is namelijk een ruimtetijd die versneld uitdijt, en waarvan de metriek niet tijdsonafhankelijk is. Het is de metriek die bij goede benadering ons universum bescheef tijdens inflatie, een korte periode van extreme uitdijning vlak na het ontstaan van het universum.

Toch is niet alles verloren: je kan ook een metriek opschrijven voor een *gedeelte* van de de Sitterruimte, bijvoorbeeld de zogenaamde *static patch*. Dit kan je je voorstellen als de binnenkant van een grote bol die letterlijk strekt zover we kunnen zien, en waarvan we de rand de kosmologische horizon noemen. Daarbuiten beweegt alles zich *sneller* dan het licht van het middelpunt vandaan, door de uitdijning van het heelal, en daarvoorbij kan je dus niets zien. Dit is een beetje als de horizon van een zwart gat, maar dan binnenstebuiten. Voor alleen dit gedeelte van de de Sitterruimte kan je wél een tijdsafhankelijke metriek opschrijven, en dus ook een unieke definitie van de energie geven!

Hoewel zo'n lokale definitie van energie werkt, streven veel natuurkundigen naar een globale definitie voor de hele ruimtetijd. Velen denken dat de ruimtetijd *emergent* is uit een diepere, *quantummechanische* theorie. In de quantummechanica is er een belangrijk object genaamd de Hamiltoniaan die per definitie behouden is. Als de ruimtetijd inderdaad emergent is uit een onderliggende quantummechanische theorie, zou energie uiteindelijk zo dan toch goed gedefinieerd en behouden moeten zijn.

Over al deze onderwerpen zijn recent ook twee, enigszins gedramatiseerde, maar wel uitgebreide video's van het YouTube-kanaal Veritasium verschenen, waarvan de eerste ook vergelijkbare onderwerpen als [mijn laatste artikel](#) bespreekt, zo vertelde iemand mij na het publiceren. Je vindt de video's onder dit artikel terug.

Dank aan Elz voor het insturen van deze interessante vraag! Heb jij ook een vraag over natuurkunde? Stuur je vraag dan naar info-at-quantumuniverse.nl (vervang de -at- natuurlijk door een apenstaartje). Je kan [hier](#) teruglezen aan welk soort vragen je kan denken.