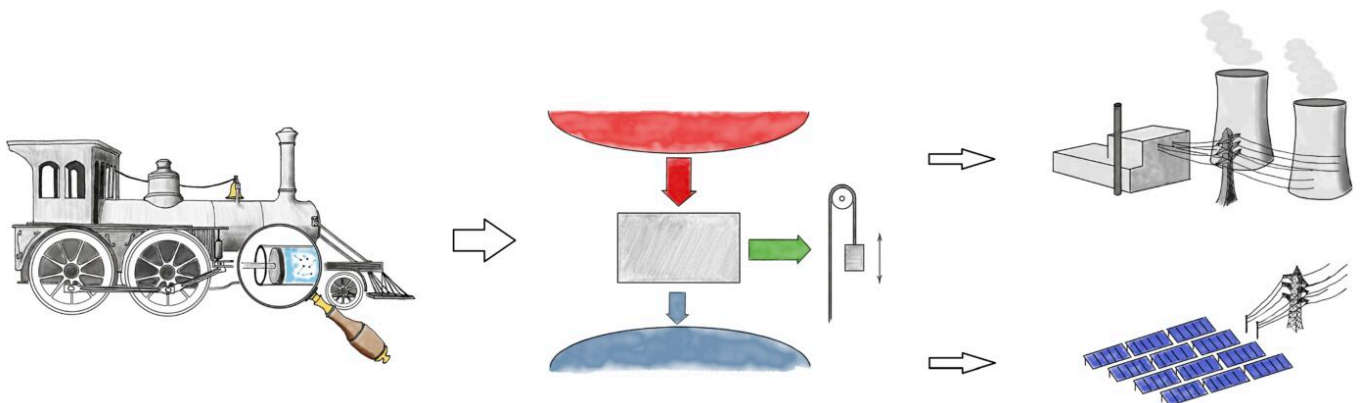


# Toch geen 'tweede wet van verstrengeling'

**Wanneer twee microscopische systemen met elkaar zijn verstrengeld, zijn hun eigenschappen met elkaar verbonden, onafhankelijk van hoe ver de twee fysiek uit elkaar liggen. Het behandelen van dit unieke quantummechanische fenomeen maakt quantumcryptografie, -communicatie en -berekeningen mogelijk. Hoewel er overeenkomsten zijn gevonden tussen verstrengeling en de klassieke fysica van warmte, legt nieuw onderzoek de limieten van deze vergelijking bloot. Verstrengeling is nog gecompliceerder dan we tot nu toe dachten.**



**Afbeelding 1. De Carnot-cyclus.** De Carnot-cyclus is een algemeen model van energieproductie dat toegepast kan worden op elke energiebron. Ontworpen door de Franse natuurkundige en pionier Sadi Carnot in 1824, toen alleen nog stoommachines beschikbaar waren, kan het model vandaag de dag even goed toegepast worden op kerncentrales of zonne-energie.

## De kracht van de tweede wet

De tweede wet van de thermodynamica wordt vaak gezien als de enige natuurwet die absoluut en ongetwijfeld waar is. Die tweede wet stelt dat de hoeveelheid van de zogenoemde 'entropie' van een gesloten systeem nooit kan afnemen. Hij voegt een 'pijl van

de tijd' toe aan dagelijkse gebeurtenissen, door te bepalen welke processen omkeerbaar zijn, en welke niet. De wet verklaart waarom een ijsblokje op een hete plaat altijd zal smelten, en waarom drijfgas in een spuitbus alleen naar buiten vliegt, en nooit andersom.

Alleen wanneer twee toestanden precies dezelfde entropie en energie hebben, kan de een in de ander worden omgezet. Deze voorwaarde voor omkeerbaarheid leidde tot de ontdekking van thermodynamische processen als de (geïdealiseerde) Carnot-cyclus, die een bovengrens stelt aan hoe efficiënt je warmte kunt omzetten in arbeid, en andersom, door een gesloten systeem langs verschillende temperaturen en drukken te laten gaan. Ons begrip van dit proces lag onder andere ten grondslag aan de snelle economische ontwikkeling van de westerse industriële revolutie.

## Quantumentropie

Het mooie aan de tweede wet van de thermodynamica is dat je hem kunt toepassen op *ieder* macroscopisch systeem, ongeacht de microscopische details. In quantumsystemen kan een van die details verstrengeling zijn: een quantumverbinding die ervoor zorgt dat afgezonderde componenten van het systeem eigenschappen delen. Ondanks dat de quantummechanica meestal wordt bestudeerd in microscopische systemen, zijn er vele diepgaande overeenkomsten gevonden tussen quantumverstrengeling en de thermodynamica. Wetenschappers hebben zelfs een 'verstrengelingsentropie' ontdekt die in ieder geval voor quantumsystemen die perfect geïsoleerd zijn van hun omgeving dezelfde rol speelt als de klassieke entropie.

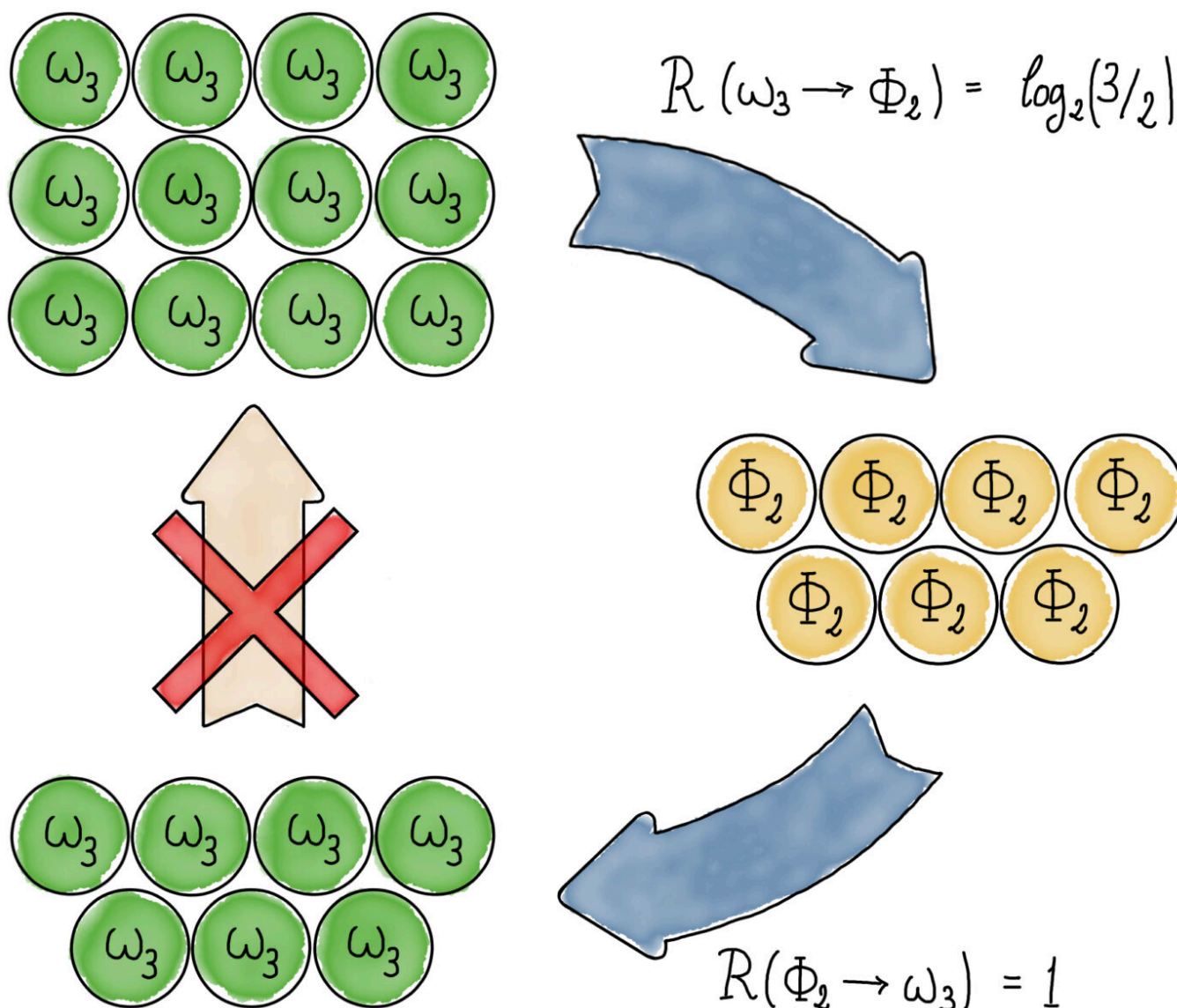
"Quantumverstrengeling ligt ten grondslag aan een groot deel van de kracht van toekomstige quantumcomputers. Om hier effectief gebruik van te maken, moeten we leren hoe we die kunnen bewerken," zegt quantuminformatie-onderzoeker Ludovico Lami. Een fundamentele vraag werd of we verstrengeling altijd omkeerbaar kunnen manipuleren, in directe analogie met de Carnot-cyclus. Het is hierbij cruciaal dat deze omkeerbaarheid ook zou moeten gelden voor 'gemengde' quantumsystemen die niet goed geïsoleerd zijn gehouden van hun omgeving.

Het vermoeden was dat er een 'tweede wet van verstrengeling' zou bestaan, in de vorm van een enkele vergelijking die de verstrengelingsentropie zou generaliseren en toepasbaar zou zijn op alle protocollen van verstrengelingsmanipulatie. Dit voorstel werd genoemd in een

beroemde [lijst van open vraagstukken](#) in de quantuminformatietheorie.

## Geen tweede wet van verstrengeling

Deze lang openstaande vraag is nu beantwoord, dankzij onderzoek verricht door Lami (voorheen Universiteit van Ulm en tegenwoordig bij QuSoft en Universiteit van Amsterdam) en Bartosz Regula (Universiteit van Tokyo). Hun werk laat zien dat verstrengelingsmanipulatie fundamenteel onomkeerbaar is, waardoor een tweede wet van verstrengeling onmogelijk is.



**Afbeelding 2. Onomkeerbaarheid.** De quantumtoestand  $\omega_3$  is onomkeerbaar: om er zeven kopieën van te maken vanuit zuivere verstrengeling, zijn ongeveer zeven 'entanglement bits' (ebits) nodig, maar als dat gebeurd is kunnen de zeven gebruikte ebits

niet meer hersteld worden. Om zeven ebits wel te herstellen zouden ongeveer twaalf kopieën van de toestand nodig zijn.

Dit nieuwe resultaat maakt gebruik van een specifiek soort quantumtoestand die erg 'duur' is om te maken met pure verstrengeling. Bij het maken van deze toestand zal altijd een deel van de verstrengeling verloren gaan, aangezien de geïnvesteerde verstrengeling niet volledig kan worden hersteld. Als gevolg hiervan is het inherent onmogelijk om deze toestand in een andere te transformeren en weer terug. Het bestaan van dergelijke toestanden was hiervoor onbekend.

De gebruikte methode sluit in één klap de omkeerbaarheid van verstrengelingsmanipulaties uit in alle mogelijke situaties, omdat die niet veronderstelt welke exacte transformatieprotocollen worden gebruikt. De methode werkt voor *alle* protocollen, zolang ze zelf geen nieuwe verstrengeling genereren. Lami licht toe: "het gebruik van verstrengelende operaties is als het runnen van een distilleerderij waarin in het geheim alcohol van elders aan de drank wordt toegevoegd."

Lami: "We kunnen concluderen dat geen enkele grootheid zoals de verstrengelingsentropie, ons alles kan vertellen wat er te weten valt over de toegestane transformaties van verstrengelde fysische systemen. De theorieën van verstrengeling en thermodynamica worden dus beheerst door fundamenteel verschillende en onverenigbare wetten."

Verstrengeling blijkt dus niet zo simpel als wetenschappers hadden gehoopt. In plaats van een nadeel te zijn, kan de veel grotere complexiteit van de theorie van verstrengeling in vergelijking met de klassieke wetten van de thermodynamica ons echter in staat stellen om verstrengeling te gebruiken voor prestaties die anders volkomen ondenkbaar zouden zijn. "Wat we nu zeker weten, is dat verstrengeling een nog rijkere en gecompliceerdere structuur verbergt dan we dachten," aldus Lami.

## Publicatie

Ludovico Lami en Bartosz Regula: [No second law of entanglement manipulation after all.](#) Nature Physics 2023.