

Warum die Tasse nicht nach oben fällt.

Thermodynamik, Entropie und Quantenmechanik.

Günter Sturm, ScienceUp Sturm und Bomfleur GbR,
Camerloherstr. 19, D-85737 Ismaning
www.ScienceUp.de

Sitzen Sie gerade an Ihrem Schreibtisch mit einer dampfenden Tasse Kaffee? Dann wünsche ich Ihnen, dass Folgendes nicht passiert: Sie stoßen zufällig an die Tasse, diese fällt nach unten und zerbricht, wobei sich der Kaffee auf dem Teppichboden verteilt. Sowas ist ärgerlich, aber jederzeit möglich. Das kann leicht passieren, und vielleicht ist es Ihnen auch schon selbst passiert.

Ist Ihnen auch Folgendes schon passiert? Der heiße Kaffee auf dem Teppichboden kühlt sich plötzlich ab. Die dadurch frei werdende Energie nutzt der Kaffee, um in Richtung Tasse zu fließen, welche sich ebenfalls abkühlt und mit dem Kaffee zusammen wieder auf den Tisch fliegt. Unmöglich, sagen Sie? Nun, energetisch gesehen keinesfalls. Gehen wir davon aus, dass sich sowohl Kaffee als auch Tasse um 70°C abkühlen, so entspricht - grob geschätzt - die dabei frei werdende Energie dem 1000fachen derjenigen Energie, die nötig wäre, um wieder auf den Schreibtisch zu "fliegen". Möglich wäre es also.

Aber es ist unwahrscheinlich. So unwahrscheinlich, dass es seit Bestehen des Universums noch nirgends im Universum passiert ist. Es muss also neben der Energie noch eine andere Größe geben, die den "Lauf" des Universums bestimmt. Diese Größe nennt man Entropie.

Was ist diese Entropie und welche Auswirkungen hat sie? Und was hat das Ganze mit Quantenmechanik zu tun? Lesen Sie weiter, in dieser Reihenfolge werden wir das Thema behandeln.

Die dritte Theorie

Physikalische Theorien gelten solange, bis sie durch Experimente widerlegt wurden. So zeigten Versuche Anfang des letzten Jahrhunderts, dass die - heute "klassisch" genannte - Mechanik bei sehr kleinen Dimensionen versagt. Eine neue Theorie musste her, die Quantenmechanik.

Es zeigte sich ebenfalls, dass die klassische Mechanik bei Objekten, die sich annähernd mit Lichtgeschwindigkeit bewegen, nicht mehr stimmt. Einsteins Relativitätstheorie ersetzt hier die

klassische Mechanik. Und obwohl sich beide Theorien noch nicht in einer neuen "vereinigten" Theorie kombinieren lassen, gelten beide für sich heute als richtig.

Es gibt eine dritte wichtige Theorie, die vor ca. 100 Jahren entstand: Die Thermodynamik. Diese Theorie behandelt die Beziehungen zwischen den makroskopischen Eigenschaften von Systemen. Dabei werden Größen wie Wärme, Arbeit, Energie und eben auch Entropie verwendet. Und auch hier gilt: Es spricht nichts gegen diese Theorie. Mit ihrem System aus partiellen Differentialgleichungen ist sie in sich abgeschlossen, ja von "mathematischer Schönheit".

Eine für Alles

Die Thermodynamik erklärt den Ablauf aller makroskopischen Phänomene - bis hin zum Ende des Universums - mit vier Hauptsätzen. Der sogenannte nullte Hauptsatz definiert die Temperaturmessung. Der erste Hauptsatz ist nichts anderes als der aus der Schule bekannte Energieerhaltungssatz: Energie kann weder "verloren gehen" noch aus "nichts" erzeugt werden. Der zweite und der dritte Hauptsatz beschreiben die Entropie, jene geheimnisvolle Größe, die z. B. den Ablauf chemischer Reaktionen bestimmt, dem Wirkungsgrad von Wärmekraftmaschinen eine natürliche Grenze auferlegt und unsere Tasse am Fliegen hindert.

Alles immer wieder von vorn?

Drei Begriffe sind zum Verständnis der Entropie wichtig: Das System, dessen Umgebung und die Prozesse zwischen beiden. Das System ist - vereinfacht gesagt - das betrachtete Objekt (z. B. Kaffeetasse mit Kaffee), das mit seiner Umgebung (dem Rest des Universums) in Kontakt steht. Das System kann in bestimmten Prozessen sowohl Energie (Wärme oder Arbeit) als auch Materie mit der Umgebung austauschen. Ist so ein Austausch jederzeit rückgängig zu machen? Kann das Gleiche wieder und immer wieder ablaufen?

Wenn ja, spricht man von einem reversiblen Prozess. Und hier kommt die Entropie ins Spiel. Schreibt man die Entropieänderung des gesamten Universums ΔS_{univ} als Summe der Entropieänderungen des Systems ΔS_{sys} und der Umgebung (Rest des Universums) ΔS_{umg} , so gilt für reversible Prozesse:

$$\Delta S_{\text{univ}} = \Delta S_{\text{sys}} + \Delta S_{\text{umg}} = 0$$

Reversibel ist ein Prozess jedoch nur, wenn das System mit der Umgebung ständig im Gleichgewicht ist, alle Prozesse also in unendlich kleinen Schritten ablaufen. Praktisch bedeutet

dies, dass die Änderungen unendlich langsam ablaufen müssten, wengleich dieser Satz im "thermodynamischen Sinne" nicht ganz korrekt ist, da hier die Zeit ins Spiel gebracht wird. Die Tasse fällt und zerbricht jedoch plötzlich, das ist also ein irreversibler, nicht mehr rückgängig zu machender Prozess. Hier gilt:

$$\Delta S_{\text{univ}} = \Delta S_{\text{Syst}} + \Delta S_{\text{Umg}} > 0$$

Insgesamt gilt also für die gesamte Entropie im Universum bei allen Prozesse (reversibel und irreversibel):

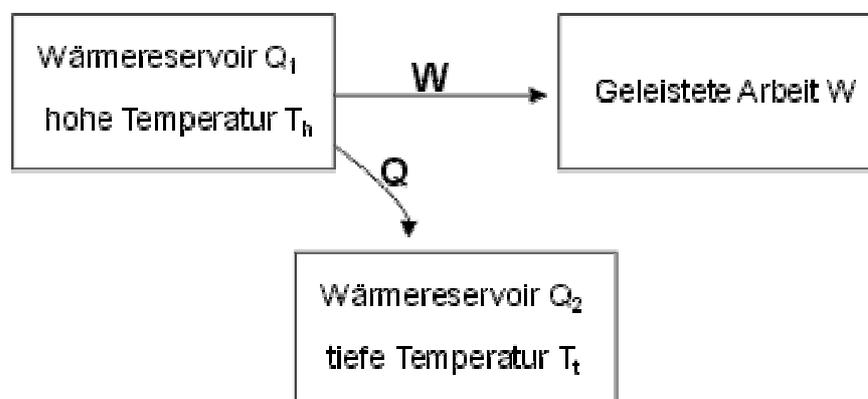
$$\Delta S_{\text{univ}} \geq 0$$

Entropie kann im Universum nur erzeugt, aber nie vernichtet werden. Dies unterscheidet sie von der Energie, die weder erzeugt noch vernichtet werden kann.

Am Ende des Universums

Nicht nur durch Douglas Adams wissen wir, was uns am Ende des Universums bevorsteht. Auch die Thermodynamik macht hier eine Aussage: Das Ende des Universums ist ein Zustand maximaler Entropie, der sogenannte "Wärmetod".

Aber der zweite Hauptsatz hat noch andere Konsequenzen als den Wärmetod des Universums und das Flugverbot für Kaffeetassen. Eine der wichtigsten ist die Unmöglichkeit, eine Wärmekraftmaschine (Heizkraftwerk, Auto, Kühlschrank, ...) zu bauen, die nichts anderes macht, als Wärme in Arbeit umzuwandeln. Bei der Umwandlung von Wärme Q in Arbeit W muss vielmehr immer ein Teil der Wärme - und damit auch Entropie - an ein kälteres Reservoir abgegeben werden. Kälter meint hier kälter als das System, das die Arbeit leistet.



Entropie, was bist du?

Bisher können wir uns unter der Entropie noch nichts Anschauliches vorstellen. Hier hilft die statistische Interpretation der Thermodynamik, die die Entropie als Unordnungsgrad interpretiert. Damit erklärt sich der Wärmetod des Universums als ein Zustand maximaler Unordnung, bei dem alle Materie gleichmäßig im Raum verteilt ist. Und auch unser Kaffeetassen-Problem wird anschaulich: Kaffee in der Tasse und Tasse auf dem Schreibtisch: ein ordentlicher Zustand. Kaffee auf dem Boden, Tasse kaputt: Unordnung herrscht.

Damit nun die Tasse wieder auf den Tisch fliegt, müssten alle Atome im Kaffee und in der Tasse ihre ungeordnete Wärmebewegung aufgeben, sich in eine bestimmte Richtung bewegen, sich zur Tasse mit Kaffee zusammensetzen und dann noch auf den Schreibtisch fliegen. Sehr, sehr unwahrscheinlich.

Was hat das alles mit Quantenmechanik zu tun?

Die Thermodynamik ist mit der Quantenmechanik nicht nur vereinbar, sondern sogar kombinierbar. Eine eigene Theorie, die statistische Thermodynamik, berechnet die Eigenschaften makroskopischer Systeme aus den mikroskopischen Eigenschaften der einzelnen Teilchen. Zentraler Begriff ist hier die Zustandssumme Z , also die Summe über alle möglichen quantenmechanischen Eigenenergien E_j eines Systems:

$$Z = \sum_j e^{-\frac{E_j}{kT}}$$

Aus dieser Zustandssumme Z können prinzipiell alle anderen thermodynamischen Größen wie Energie oder Entropie berechnet werden.

Gar keine quantenmechanischen Besonderheiten in der Thermodynamik?

Doch! Dies zeigt ein vor kurzem vorgestelltes theoretisches Modell des Physikers Marlan O. Scully von der Texas A&M University [1]. Erinnern wir uns nochmals an die weiter oben

beschriebene Wärmekraftmaschine. Der theoretisch bestmögliche Wirkungsgrad einer Wärmekraftmaschine kann als Konsequenz des zweiten Hauptsatzes wie folgt angegeben werden:

$$\eta = 1 - \frac{T_t}{T_h}$$

Der Wirkungsgrad ist nur durch den Temperaturunterschied zwischen heißem (T_h) und kaltem (T_t) Reservoir bestimmt. Ein einzelnes isoliertes Wärmereservoir kann also nie Arbeit leisten, es muss immer ein Teil der Wärme an ein kälteres Reservoir abgeführt werden.

Wenn beide Wärmereservoir auf gleicher Temperatur sind, ist der Wirkungsgrad null.

Scully stellte nun einen theoretischen Ansatz vor, der dieses sogenannte "Carnot-Limit" brechen könnte: Der vorgestellte reversible und geschlossene Prozess arbeitet effizienter als nach Carnot erlaubt. Seine "Photonen Dampfmaschine" kann unter Ausnutzung der quantenmechanischen Kohärenz Arbeit aus einem einzigen Wärmereservoir entnehmen. Die Rolle des Dampfes übernehmen hier Photonen, das Wärmereservoir besteht aus heißen Atomen, die über Emissions- und Absorptionsprozesse Energie mit den Photonen austauschen. Wenn in den heißen Atomen Quantenkohärenz erzeugt wird, kann die die Photonenstrahlung ("Dampf") charakterisierende Temperatur T_p von T_h verschieden sein. Daher kann auch im Fall $T_h = T_t$, also aus nur einem Wärmereservoir, Arbeit geleistet werden.

Und der zweite Hauptsatz?

Der gilt nach wie vor, auch in der Quantenmechanik. Das Experiment verletzt die Gültigkeit nicht, da die Erzeugung der Kohärenz extra Energie- und Entropie kostet. Die ganze Entropie des Systems steigt also auch bei einer Photonendampfmaschine. Das besondere ist hier nur, dass Arbeit von einem *einzigem* Wärmereservoir geleistet wird.

Damit wäre es aber durchaus denkbar, dass eine Quanten-Wärmekraftmaschine eines Tages als "Quanten-Nachbrenner" die Effizienz von Verbrennungsmotoren erhöht.

Günter Sturm

Literatur:

- [1] "Extracting Work from a Single Heat Bath via Vanishing Quantum Coherence", Marlan O. Scully, M. Suhail Zubairy, Girish S. Agarwal, Herbert Walther, *Science* **299**, 862-864 (2003).

© 2003 ScienceUp Sturm und Bomfleur GbR, Alle Rechte vorbehalten. Nichtkommerzieller Nachdruck und Wiedergabe gestattet bei Quellenangabe ScienceUp Sturm und Bomfleur GbR, www.ScienceUp.de.