

Unordnung im Fokus

Neue Experimente erlauben Einsichten in die noch weitgehend unverstandene Phänomenologie der Vielteilchenlokalisierung in zwei Dimensionen.

Prof. Dr. Jens Eisert,
FU Berlin, Arnimallee
14, 14195 Berlin

Mit dem Begriff Temperatur kann jeder etwas anfangen. Schon als Kind lernen wir, was es heißt, wenn ein Objekt heiß oder kalt ist. Die Temperatur ist für die Urlaubsplanung ebenso wichtig wie für industrielle Prozesse. So überrascht es kaum, dass sie bereits früh in den Fokus der Forschung kam. Doch wie entsteht Temperatur? Im zweiten Hauptsatz der Thermodynamik spielt sie eine Schlüsselrolle. Die statistische Physik gibt eine einfache Antwort darauf, wie ein thermischer Zustand zu fassen ist: Er ist, in einem bestimmten Sinne, ein Zustand maximaler Entropie.

Allerdings sagt die statistische Mechanik viel weniger dazu aus, wie solche thermischen Zustände auf Basis der mikroskopischen Grundgleichungen der Quantenmechanik entstehen. Insbesondere bleibt die Entropie bei der Schrödinger-Gleichung, der fun-

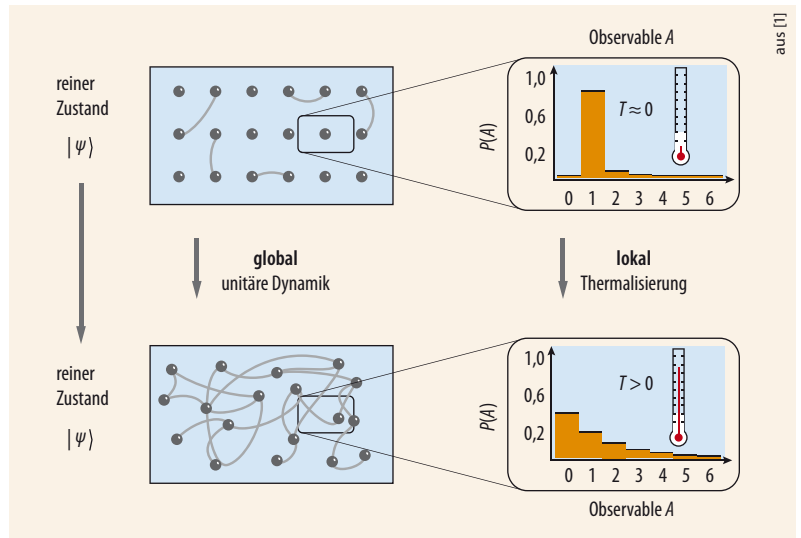


Abb. 1 Ein isoliertes Quantensystem bei 0 K lässt sich in der Regel durch einen einzigen Zustandsvektor $|\psi\rangle$ beschreiben. Untersysteme erscheinen rein, solange Verschränkung (graue Linien) zwischen ihnen vernachlässigbar ist. Nach einer Störung entwickelt sich das gesamte System unitär, und erhebliche Ver-

schränkung zwischen allen Teilsystemen bildet sich heraus. Das Gesamtsystem bleibt in einem reinen Zustand ohne Entropie. Aufgrund der Entropie der Verschränkung thermalisieren aber die Untersysteme. So erscheinen lokal thermisch gemischte Zustände in einem global reinen Quantenzustand.

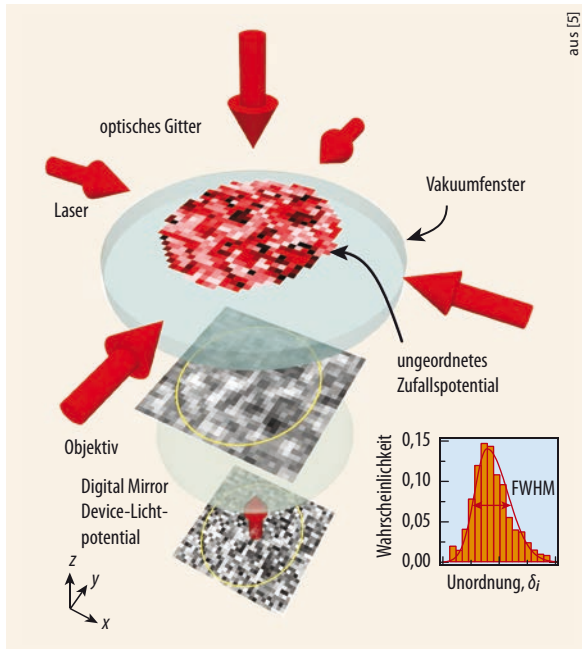


Abb. 2 Ein ungeordnetes 2D-Zufallspotential wird auf eine einzelne Atomlage in einem optischen Gitter abgebildet. Die Unordnung wird mit Hilfe eines Digital Mirror Device kontrolliert, das ein Gauß-Profil in eine zufällige 2D-Intensitätsverteilung mit räumlich einheitlicher Lichtintensität umwandelt (unten). Das Mikroskopobjektiv glättet die Unordnungsverteilung (Histogramm rechts unten). Das Bild in der Mitte zeigt die geglättete Lichtintensitätsverteilung, das obere das lokale Unordnungspotential, gemessen mittels In-situ-Spektroskopie. Der gelbe Kreis markiert die spektroskopisch kalibrierte Region.

damentalen Bewegungsgleichung der Quantenmechanik, erhalten. So mag es überraschen, wie Zustände maximaler Entropie überhaupt entstehen können. Einmal in einem reinen Quantenzustand mit verschwindender Entropie, wird der Zustand eines abgeschlossenen Quantenzustands immer rein bleiben. Natürlich lässt sich argumentieren, dass Systeme nie ganz abgeschlossen, sondern immer an eine Umgebung gekoppelt sind. Das ist zwar nicht von der Hand zu weisen, verschiebt aber nur das Problem. Denn warum sollte die Umgebung thermisch sein? Wie ist dieser scheinbare Widerspruch aufzulösen?

Diese Frage hat schon in der Frühzeit der Quantenmechanik die Gemüter bewegt. Allerdings sind zentrale Einsichten, wie abgeschlossene Quantensysteme mit vielen Freiheitsgraden ins Gleichgewicht kommen, erst in den letzten Jahren gelungen. Die genauen Mechanismen sind kompliziert und manche Details noch nicht verstanden, trotz eines umfassenden Forschungs-

programms [1–4]. Die Grundidee aber ist einfach: Information über die Anfangsbedingungen verteilt sich im Laufe der Zeit über das gesamte System. Daher sehen lokale Größen wie die lokale Atomzahl an einem Gitterplatz so aus, als würden sie ins Gleichgewicht kommen und thermalisieren. Auch wenn das Gesamtsystem nie „wirklich“ thermalisiert, erscheint es für lokale Größen so. Jeder Teil des Systems fungiert für die anderen gewissermaßen als thermisches Bad.

Das lässt sich sogar experimentell nachweisen, wie es kürzlich der Gruppe von Markus Greiner an der Harvard University mit ultrakalten Atomen in optischen Gittern gelungen ist [1]: Durch Verschränkung wird die lokale Entropie des Zustands weniger Gitterplätze maximal, auch wenn das gesamte System in einem Zustand kleiner Entropie verbleibt (Abb. 1). In diesen Experimenten ist die Entropie tatsächlich messbar, wenn mehrere gleichartige Systeme zur Interferenz gebracht werden. Man erwartet, dass abgeschlossene Quantensysteme in

diesem Sinne thermalisieren und Temperatur „entsteht“, weitgehend unabhängig von den genauen Details des Systems.

Unordnung bringt genau dieses Bild gehörig durcheinander. Quantensysteme mit Unordnung weigern sich vehement zu thermalisieren. Das gilt jedenfalls, wenn die Unordnung in Form eines zufälligen Potentials in der passenden Dosierung daherkommt. Einmal aus dem Gleichgewicht gebracht, kommen sie in der Tat zur Ruhe und zeigen stationäres Verhalten. Allerdings bleiben sie auf dem Weg zur Thermalisierung gewissermaßen stecken, erinnern sich noch an ihre Anfangsbedingungen und behalten Eigenschaften, die von thermischen Systemen nicht zu erwarten sind. Die bekannten Ensembles, die Temperatur beschreiben, entstehen nicht. So trotzten solche ungeordneten Quantensysteme den Kernannahmen der statistischen Physik. Derartige Quantensysteme, in denen Unordnung und Wechselwirkung zusammenkommen, sind in den Fokus der Aufmerksamkeit gerückt. Das Phänomen ist als Vielteilchenlokalisierung bekannt.

In der Tat entwickelt sich hinsichtlich der Vielteilchenlokalisierung ein Krimi ohnegleichen. Nicht nur, dass solche Systeme nicht ins thermische Gleichgewicht kommen. Sie besitzen merkwürdige lokale Erhaltungsgrößen, ihre Verschränkungseigenschaften wachsen kurios logarithmisch an und ihre Eigenfunktionen sind erstaunlich unkorreliert. Auch wenn dies technisch klingen mag: Systeme, die Vielteilchenlokalisierung zeigen, widersprechen vielem Lehrbuchwissen über Quantensysteme mit vielen Freiheitsgraden. Durch rege Forschungsaktivität kommt in den letzten Jahren endlich Licht ins Dunkel des Phänomens – zumindest in einer Raumdimension ist es inzwischen recht gut verstanden.

Wissenschaftler um Christian Groß und Immanuel Bloch am Max-Planck-Institut für Quantenoptik loten dieses Phänomen in einem wichtigen Experiment erstmals in höheren Raumdimensionen aus [5]. Hierzu wurden ultrakalte

Atome in ein zweidimensionales optisches Gitter geladen, über dem ein ungeordnetes Zufallspotential liegt (Abb. 2). Nachdem das System anfänglich fernab vom Gleichgewicht präpariert wurde, ließ sich die Dynamik Atom für Atom verfolgen – wie in einem Film, der die Bewegung eines Objektes nachzeichnet. Die experimentellen Daten zeigen, dass das System ab einer bestimmten Unordnung eben nicht mehr thermalisiert und nicht die bekannten Signaturen der statistischen Mechanik besitzt. Zudem ergibt sich bei der Annäherung an den Lokalisierungsübergang eine starke Evidenz für eine divergente Korrelationslänge. Dies ist umso bemerkenswerter, da die Theorie der Vielteilchenlokalisierung in zwei Dimensionen theoretisch noch weitgehend unverstanden ist und nicht klar war, dass es dort überhaupt einen solchen Übergang gibt.

Das Experiment geht nicht nur über die bekannten theoretischen Beschreibungen hinaus. Auch die besten Simulationsmethoden auf modernen Supercomputern erlauben es nicht, alle Aspekte der Dynamik nachzuzeichnen. Nicht einmal die Dynamik der Dichteverteilung lässt sich effizient simulieren. Insofern eröffnet das Experiment neue Einblicke in ein erstaunliches Phänomen, das an den Grundlagen der statistischen Physik rüttelt. Zudem ist es ein weiterer Schritt in Richtung eines Quantensimulators [4], der als abstrakte Idee schon Richard Feynman in den 1980er-Jahren vorschwebte. Das ist eine kontrollierte Simulation eines Quantenphänomens mit Hilfe eines Quantensystems, welche die Möglichkeiten einer klassischen Simulation auf herkömmlichen Rechnern übersteigt. Insofern deutet das Experiment eine neue Methode an, um zu Schlüssen über Phänomene in der Natur zu kommen.

Jens Eisert

- [1] A. M. Kaufman et al., Science akzeptiert (2016), arXiv:1603.04409
- [2] J. Eisert et al., Nat. Phys. **11**, 124 (2015)
- [3] A. Polkovnikov et al., Rev. Mod. Phys. **83**, 863 (2011)
- [4] S. Trotzky et al., Nat. Phys. **8**, 325 (2012)
- [5] J.-Y. Choi et al., Science **352**, 1547 (2016)