

# Simulation physikalischer Grundkräfte mit ultrakalten Atomen

## Eichtheorien im Quantensimulator

ROBERT OTT | PHILIPP HAUKE

*Großskalige Quantensimulatoren versprechen die kontrollierte Untersuchung komplexer Fragestellungen auf verschiedenen Gebieten der Physik. Das kontrollierte Zusammenspiel von quantenmechanischen Bausteinen könnte ein detaillierteres Verständnis von Eichtheorien und somit der Grundkräfte der Natur ermöglichen. Wir beschreiben die Realisierung eines Quantensimulators zur Untersuchung einer einfachen Eichtheorie sowie dessen Anwendung auf Fragen der Echtzeit-Dynamik der zugehörigen elektrischen Felder und Ladungen.*

Quantenfelder durchziehen Raum und Zeit, ihre Anregungen beschreiben die fundamentalen Bausteine und Kräfte der Natur. Prominente Beispiele sind die Quantenfelder der Quantenelektrodynamik, welche die elektromagnetischen Kräfte erklärt, und der Quantenchromodynamik, welche die starke Kernkraft beschreibt. Beide werden mathematisch über Eichtheorien [1] formuliert, die nach dem Standardmodell der Teilchenphysik und zusammen mit der Gravitation die fundamentalen Kräfte der Natur bilden. Diese Kräfte sind für den Aufbau von Materie, das heißt die Zusammensetzung und Eigenschaften von Molekülen, Atomen und deren Kernen, von zentraler Bedeutung. Darüber hinaus kommt zum Beispiel die elektromagnetische Kraft in verschiedensten alltäglichen physikalischen Phänomenen zur Geltung, etwa bei der Leitung des elektrischen Stroms.

Die zugehörigen Quantentheorien, die akkurate Vorhersagen ermöglichen, wurden größtenteils während des 20. Jahrhunderts entwickelt, im Zusammenspiel mit experimentellen Entdeckungen in großen Teilchenbeschleunigern, zum Beispiel am europäischen Kernforschungszentrum (CERN). Mit fortschreitender Forschung wurde das Wissen über den mikroskopischen Aufbau der Natur zunehmend detaillierter. Damit wuchs der Anspruch an experimentelle Aufbauten, aber auch an die Komplexität theoretischer Modelle sowie an die erforderlichen Ressourcen, um innerhalb dieser Modelle Berechnungen durchzuführen. Denn wenngleich die mathematische Beschreibung

bestimmter Wechselwirkungen in vielen Fällen bekannt ist, ist das Lösen der daraus erwachsenden Gleichungen ein extrem aufwendiges Unterfangen.

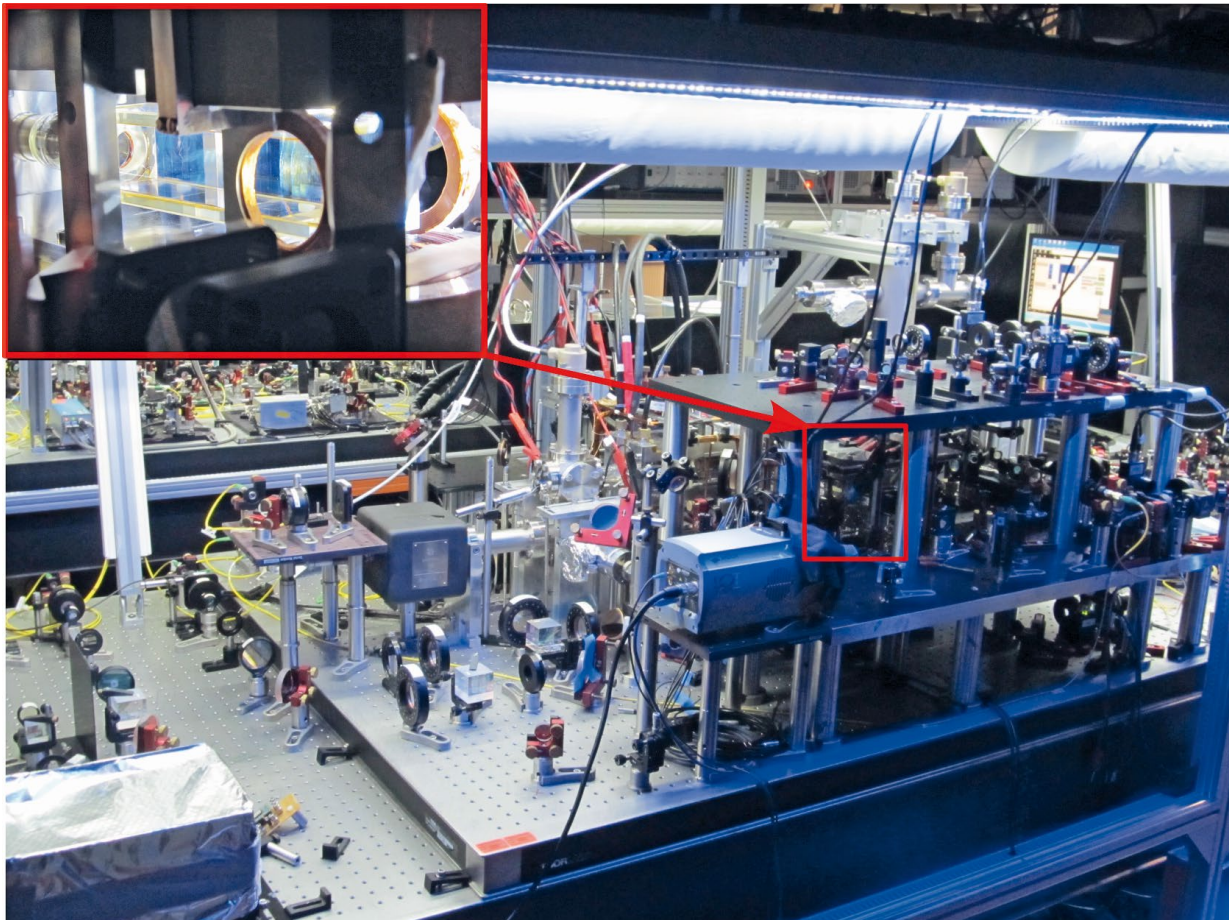
Viele moderne Berechnungen bauen auf umfassenden Computersimulationen auf, die in großen Rechenzentren auf Supercomputern durchgeführt werden. Trotz dieser massiven Ressourcen sind die Rechnungen oftmals jedoch so komplex, dass sie nicht exakt durchführbar sind. Dann sind Näherungen der exakten Gleichungen erforderlich, die in der Regel nur für gewisse Bereiche der Theorien zulässig sind oder zu unkontrollierten Fehlern führen können.

Hier kommt die Idee der Quantensimulation ins Spiel: Um diese Schwierigkeit zu vermeiden, suchen Forschende nach Möglichkeiten, die klassischen Rechner durch quantenmechanische Simulatoren zu ersetzen. Das heißt, ein abstraktes Modell, das ein quantenmechanisches Vielteilchensystem beschreibt, wird auf Freiheitsgrade eines Laborsystems abgebildet, das selbst den Gesetzen der Quantenmechanik unterworfen ist. Das gewünschte Modell wird also durch direkte Messung im Labor „gelöst“. Das zentrale Ziel der Quantensimulation besteht somit darin, den quantenmechanischen Wechselwirkungen in der Natur mithilfe von kontrolliert operierenden und selbst intrinsisch quantenmechanischen Simulatoren auf den Grund zu gehen. Gegenwärtig existieren viele Forschungsprojekte zu dieser Frage. Einerseits wird an der Entwicklung und Verbesserung verschiedener experimenteller Plattformen zur gezielten Manipulation von Quantenmaterie gearbeitet, andererseits an neuen Strategien der Abbildung gewünschter Interaktionen auf diese Systeme.

### Was ist Quantensimulation?

Derartige Quantensimulationen haben das Potenzial für eine Vielzahl direkter Anwendungen, zum Beispiel in der Festkörperphysik [2]. Da die klassische Simulation von gewissen Materialien häufig zu komplex ist, versucht man die relevanten quantenmechanischen Bausteine im Labor kontrolliert zusammenzusetzen und das zu untersuchende Material und seine Eigenschaften somit zu simulieren. Andere potenzielle Anwendungen beziehen sich auf Fragen der fundamentalen Physik: Die Hoffnung ist, mithilfe von

*This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License, which permits use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited and is not used for commercial purposes.*



**Aufbau des Quantensimulators:** Die zahlreichen optischen Elemente dienen der Umleitung und Ausrichtung von Laserlicht zum Kühlen und Fangen der Rubidium-Atome sowie zur Bildung des optischen Gitters. Der vergrößerte Ausschnitt zeigt die Glaszelle, in der die Atome im Hochvakuum gefangen werden und die Quantensimulation stattfindet. Die Atome können hier durch externe Felder kontrolliert manipuliert werden, beispielsweise über die abgebildeten kreisförmigen Magnetspulen (Foto: B. Yang).

ultrakalten Atomen im Labor [2] Quantenfelder zu realisieren, wie sie beispielsweise in der Dynamik des frühen Universums oder während Kollisionen in Teilchenbeschleunigern auftreten. Diese Systeme können dann zur gezielten Untersuchung fundamentaler Fragestellungen genutzt werden.

Im Wesentlichen gibt es zwei Ansätze zur Quantensimulation. Analoge Quantensimulatoren sind hochkontrollierte Aufbauten, die es erlauben, die natürliche Dynamik des Simulators auszunutzen und durch externe Kontrollfelder zu manipulieren. Die Konstituenten des Simulators wechselwirken hierbei auf kontinuierliche Weise miteinander. Dieser Ansatz steht dem digitalen Quantencomputer gegenüber, welcher üblicherweise diskrete Quanten-Operationen (Quanten-Gatter) auf individuellen Atomen, Ionen oder supraleitenden Schaltkreisen sequenziell durchführt [3–5]. Häufig sind solche digitalen Quantencomputer darauf ausgelegt, elementare Quantengatter wie Bausteine in komplexen Schaltkreisen aneinanderzufügen, um beliebige quantenmechanische Algorithmen durchführen zu können. Beispielsweise könnte ein solches Präzisionsgerät große

Zahlen mithilfe von Peter Shors Algorithmus in Primfaktoren faktorisieren oder die Optimierung industrieller Prozesse berechnen. Die Simulation von quantenmechanischer Materie ist hier nur einer von vielen möglichen Anwendungsfällen. Dieser digitale Ansatz erlaubt zwar eine extreme Flexibilität, erfordert aber eine sehr hohe Präzision in der individuellen Ausführung der Gatter und erschwert es in der Praxis, viele quantenmechanischen Recheneinheiten kohärent zu einem großskaligen Quantencomputer zusammenzufügen.

Im Gegensatz dazu lassen sich analoge Quantensimulatoren oft einfacher zu großen Systemen zusammensetzen, die dann komplexe physikalische Situationen abbilden können. Die genaue Unterscheidung zwischen digital und analog ist häufig jedoch etwas künstlich. Aktuell arbeiten Forschende an einer Vielzahl von Plattformen, die verschiedene Ansätze kombinieren und nicht eindeutig einer analogen oder digitalen Arbeitsweise zuzuordnen sind. Viele solcher Plattformen erlauben es, sowohl im digitalen als auch im analogen Modus zu operieren oder in Regimen, die Aspekte von beiden kombinieren.

## Eichinvarianz und das Gaußsche Gesetz

In diesem Artikel legen wir den Fokus darauf, wie analoge Quantensimulatoren helfen können, qualitative Aspekte von Eichtheorien zu untersuchen. Wir wollen hierbei allgemeine Prinzipien diskutieren, die wir am Beispiel der Quantensimulation der Quantenelektrodynamik erläutern. Diese Theorie beschreibt das Wechselspiel von geladenen Punktteilchen – Elektronen und Positronen – mit elektromagnetischen Feldern. Doch wie gelingt es, die abstrakte Beschreibung einer solchen Eichtheorie auf Freiheitsgrade im Labor abzubilden?

Im Folgenden stellen wir die Realisierung einer einfachen Eichtheorie vor, die wir vor Kurzem mithilfe von ultrakalten Atomen erreichten [6], sowie die Quantensimulation der resultierenden Echtzeit-Dynamik [7]. Die Experimente wurden von einer Gruppe aus Heidelberg und Hefei (China) durchgeführt, während die Theorie in Heidelberg und Trento (Italien) erarbeitet wurde. Dieses multinationale und interdisziplinäre Team aus Forschenden, zu dem wir gehören, veranschaulicht sehr eindrücklich die Komplexität von innovativen Quantensimulationen. Um die Eichtheorie erfolgreich im Labor zu implementieren, ist einerseits eine präzise Kontrolle der kalten Atome im Experiment erforderlich. Andererseits ist es äußerst wichtig, Theorien so zu formulieren und zu vereinfachen, dass sie im Labor realisiert werden können, dabei aber ihre grundlegenden Eigenschaften, wie die Eichinvarianz sowie relevante physikalische Phänomene, beibehalten.

In der Regel erfordern Quantenfelder eine sogenannte Regularisierung ihrer Freiheitsgrade, wobei die kontinuier-

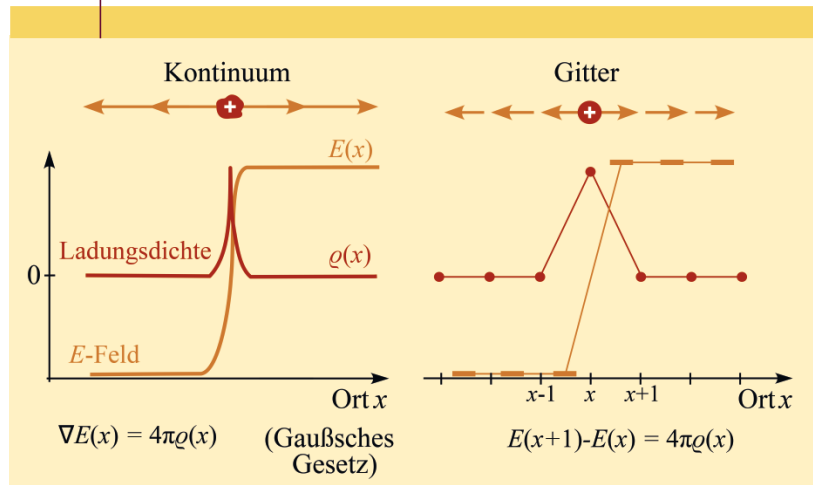
liche Theorie durch eine Gitterformulierung ersetzt wird. Eine Quantenfeldtheorie wie die Quantenelektrodynamik beinhaltet im Allgemeinen quantenmechanische Freiheitsgrade für jeden Punkt im Raum: die Felder. Allerdings ist der Raum nach unserem Verständnis kontinuierlich, das heißt in jedem Abschnitt des Raums existieren beliebig viele Punkte, und damit unendlich viele quantenmechanische Freiheitsgrade. Dies stellt ein technisches Problem dar, einerseits für die Realisierung von analogen Quantenfeldtheorien im Labor, da wir keine detaillierte Kontrolle über eine unendliche Anzahl quantenmechanischer Bausteine haben. Andererseits gilt dies auch für klassische Computersimulationen, in denen es ebenso unmöglich ist, Quantenfeldkonfigurationen mit unendlich vielen Freiheitsgraden zu bearbeiten und zu speichern.

Um dieses Problem in klassischen Computersimulationen zu umgehen, werden bereits seit mehreren Jahrzehnten sogenannte Gitterfeldtheorien entwickelt, bei denen die Felder nicht in kontinuierlichen Räumen, sondern auf diskreten Gittern leben (Abbildung 1 und [8]). Es gibt also einen großen Wissensschatz, wie Quantenfelder durch Gittertheorien mit endlicher Anzahl von zu berechnenden Freiheitsgraden ersetzt werden können. Diese Gittertheorien können dann in einem Computer, oder, wie in unserem Fall, in einem Quantensimulator simuliert oder berechnet werden. Um Rückschlüsse auf Feldtheorien zu erhalten, sind dabei häufig große und feine Gitter mit vielen Gitterpunkten vonnöten, was entsprechend „große“ Quantensimulatoren mit vielen quantenmechanischen Bausteinen erfordert. Gleichzeitig illustriert dies den großen Vorteil etwaiger Quantensimulatoren, denn es zeigt sich, dass die Komplexität vieler klassischer Berechnungen stark mit der Anzahl dieser Gitterpunkte wächst.

Eine Vereinfachung in unserer Arbeit war es, die Theorie auf eine Raumdimension einzuschränken, ähnlich wie die quantenelektrodynamische Beschreibung von Ladungsträgern in einem Draht. Eine weitere Vereinfachung bestand darin, die elektrische Feldstärke, welche im Normalfall beliebig hohe Werte annehmen kann, auf zwei mögliche Werte einzuschränken, +1 und -1, dargestellt in Abbildung 1 rechts durch einen nach rechts beziehungsweise links deutenden Pfeil. Die Eigenschaften solcher neuartigen Theorien sind in den letzten Jahren, insbesondere auch durch die Forschungsarbeit an Quantensimulationen, Gegenstand aktiver Forschung geworden. Sie bieten uns einen Ansatz, Eichtheorien mit bereits verhältnismäßig einfachen Quantensystemen zu untersuchen.

Unser Ziel ist es also, ein entsprechend analoges Gittersystem im Labor zu konzipieren, in dem die quantenmechanischen Bausteine solche Eichfelder realisieren und auf gewünschte Art und Weise miteinander wechselwirken [2]. In unserer Arbeit sind diese Bausteine ultrakalte Rubidium-87-Atome, deren Eigenschaften durch die quantenmechanischen Gesetze diktiert sind. Zunächst werden die Atome in einem Ultrahochvakuum gefangen und auf sehr kalte

ABB. 1 | ELEKTRODYNAMIK AUF DEM GITTER



**Positive Ladungen ( $\rho > 0$ ) sind Quellen elektrischer Feldlinien  $E$ , negative Ladungen ( $\rho < 0$ ) sind Senken. Das Gaußsche Gesetz besagt, dass die Anwesenheit einer elektrischen Ladung einer räumlichen Veränderung des Feldes ( $\nabla E = \rho$ ) entspricht. Links: Beispielhafte Konfiguration elektrischer Felder und Ladungen im kontinuierlichen Raum. Rechts: Für die Realisierung im Quantensimulator wird die kontinuierliche Theorie kontrolliert durch ein diskretes Gitter regularisiert. Auf diesem werden räumliche Gradienten zu Differenzen von Gitterpunkten  $x + 1$  und  $x$ . Eine Quantensimulation der Eichtheorie muss das entsprechende diskrete Gaußsche Gesetz jederorts erfüllen.**



Temperaturen von einigen Nanokelvin gekühlt. Mithilfe von Lasern werden dann stehende Lichtwellen erzeugt, die optisch mit den Atomen wechselwirken und sie dazu zwingen, sich in den Intensitätsminima zu einem Gitter anzuordnen.

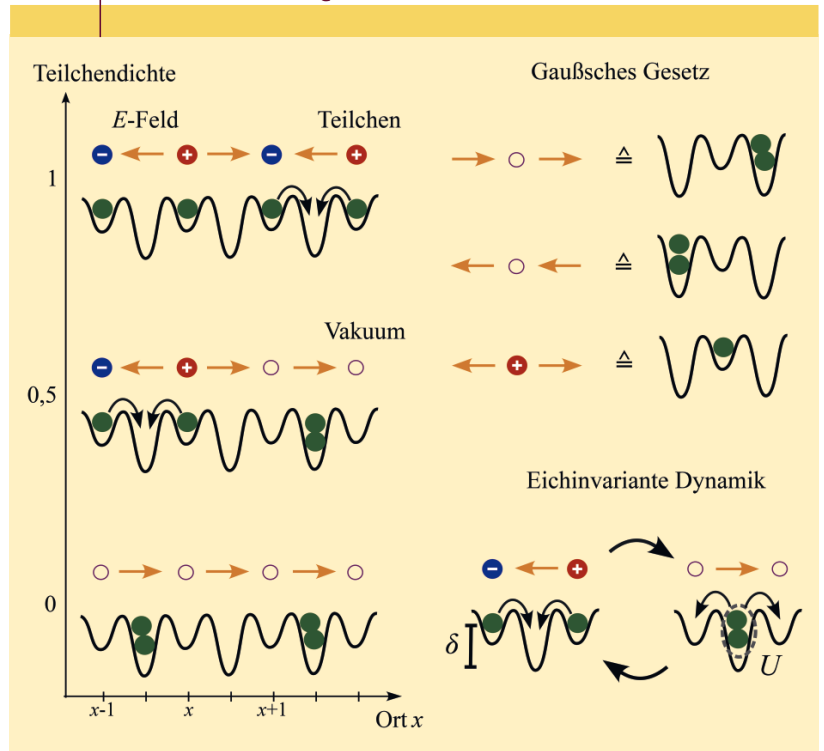
In diesem Gitter können die Atome dann quantenmechanisch von einem Gitterplatz zum nächsten tunneln. Sitzen an demselben Gitterplatz mehrere Atome, so stoßen sie sich gegenseitig ab; solche Konfigurationen führen lokal zu einer Erhöhung der Gesamtenergie des Systems. Im einfachsten Fall simuliert ein solches System mit Tunneln und lokalem Wechselwirkungspotential die Zutaten des Hubbard-Modells [9], ein vereinfachtes Modell zur Untersuchung vieler Eigenschaften von Quantenvielteilchensystemen, wie das Verhalten von Elektronen in Halbleitermaterialien. Darüber hinaus kann das System weiter modifiziert werden. Durch Hinzufügen weiterer Laser oder externer Magnetfelder kann man zum Beispiel die Energien der Atome konfigurationsabhängig kontrollieren.

Wir nutzen diesen Ansatz, um die gewünschten Wechselwirkungen der Eichtheorien zu implementieren. Um das genauer zu erklären, müssen wir zunächst die definierende Eigenschaft der Eichtheorien betrachten, die Eichinvarianz. Dies ist eine Invarianz der physikalisch möglichen Beobachtungen unter gewissen Transformationen der Feldvariablen. Ein Beispiel ist das elektrische Potential: Da beobachtbare Größen nur von Differenzen des elektrischen Potentials abhängen, lässt eine Verschiebung des Potentials um eine konstante Zahl – also ohne Änderung einer Potentialdifferenz – die Beobachtungen unverändert.

Allgemein folgen aus Eichinvarianzen eine Reihe von wichtigen Eigenschaften der zugehörigen Feldtheorien, beispielsweise, dass Lichtteilchen masselos sind und sich daher mit Lichtgeschwindigkeit bewegen. Für uns ist hier konkret eine Bedingung der Eichinvarianz von besonderer Wichtigkeit: das Gaußsche Gesetz der Elektrodynamik, das besagt, dass elektrische Feldlinien nur aus elektrischen Ladungen entspringen. Somit ist die Bewegung einer elektrischen Ladung immer auch an eine Veränderung des elektromagnetischen Feldes gekoppelt (Abbildung 1). Dies können wir sogar zur Definition der Eichinvarianz erheben: Ist das Gaußsche Gesetz in jedem Zustand der Theorie und während der gesamten zeitlichen Entwicklung erfüllt, so ist die Theorie eine Eichtheorie.

Daher ist die robuste Implementierung des Gaußschen Gesetzes in Quantensimulatoren eine fundamentale Voraussetzung, um darin fundamentale Eigenschaften der Grundkräfte untersuchen zu können. Für eine erfolgreiche Realisierung müssen wir sichergehen, dass während der gesamten Quantensimulation nur „erlaubte“ Konfigurationen der quantenmechanischen Bausteine auftreten, das heißt nur solche, die das Gaußsche Gesetz erfüllen. In anderen Worten, wir müssen den elektrisch neutralen Atomen im Laborsystem beibringen, sich wie elektrische Felder und Ladungen zu verhalten. Im Folgenden beschreiben wir, wie dies mithilfe optischer Gitter erreicht werden kann.

ABB. 2 | EICHTHEORIE IM QUANTENSIMULATOR



**Links: Atomkonfigurationen auf „flachen“ oder „tiefen“ Gitterplätzen des optischen Gitters werden Zuständen von Materieteilchen oder elektrischen Feldern der einfachen Eichtheorie zugeordnet. Hier entsprechen Atome auf flachen Gitterplätzen der Anwesenheit von Materie. Auf den flachen Gitterplätzen  $x$  interpretieren wir die Materie abwechselnd als positive (Positron) oder negative (Elektron) Ladung. Die Ausrichtung des Felds wird wiederum abwechselnd durch die An- oder Abwesenheit eines Atompaars repräsentiert. Die verschiedenen Atomkonfigurationen im Simulator erlauben es, die unterschiedlichen Parameterregime der Ladungsdichte darzustellen, die durch Paarerzeugung und Paarannihilation dynamisch ineinander übergehen. Rechts oben: Die erlaubten Konfigurationen erfüllen die diskretisierte Form des Gaußschen Gesetzes, hier beispielhaft für positive Antiteilchen dargestellt. Rechts unten: Die Abstoßungsenergie  $U$  zweier Atome entspricht in etwa dem doppelten Tiefenunterschied  $2\delta$  im optischen Gitter. So kann der eichinvariante Prozess der Teilchen-Antiteilchen-Erzeugung und -Vernichtung stattfinden. Die Differenz  $2\delta - U$  besagt, wieviel zusätzliche Energie die Konfiguration mit Teilchen-Antiteilchen-Paar hat und entspricht damit der Ruhemasse des Elektron- und Positronpaares.**

### Ladungen und elektrische Felder simulieren

Zur Quantensimulation benötigen wir zunächst eine Vorschrift beziehungsweise ein Wörterbuch, wie sich die Freiheitsgrade der Eichtheorie, also elektrische Felder und Ladungen, in Zustände der Atome im optischen Gitter übersetzen. In der konkret verwendeten Formulierung der Eichtheorie [10] wechseln sich die „Orte“ der Felder mit denen der Ladungen ab, das heißt wir ordnen Eichfelder den ungeraden, und Ladungen den geraden Gitterplätzen zu, siehe Abbildung 1 rechts.

Diese alternierende Struktur übertragen wir dann auf die Struktur des optischen Gitters (Abbildung 2) und bilden die Konfigurationen von Ladungen und elektrischen Feldern durch An- und Abwesenheit von Atomen nach. Auf den geraden Gitterplätzen identifizieren wir ein einzelnes

Atom im Simulator mit einer elektrischen Ladung der Gittertheorie, während ein abwesendes Atom ein Ladungsvakuum signalisiert. Zudem betrachten wir das bereits angesprochene vereinfachte Szenario der Quantenelektrodynamik, in dem das eindimensionale elektrische Feld auf zwei mögliche Werte  $+1$  und  $-1$  reduziert wird. Somit können diese elektrischen Felder auf den ungeraden Gitterplätzen durch zwei Konfigurationen von Atomzahlen – null oder zwei – dargestellt werden.

Anfangs sind jedoch alle Rubidium-87-Atome im Gitter gleich. A priori kann die atomare Wolke also nahezu beliebige Anordnungen einnehmen, auch solche, die das Gaußsche Gesetz verletzen – zum Beispiel negative Ladungen als Quellen anstatt Senken des Feldes oder auch Konfigurationen, die kein Pendant in der Eichtheorie besitzen. Die Herausforderung besteht darin, den Atomen auf alternierenden Gitterplätzen kontrolliert ihre jeweilige Rolle zuzuweisen und sicherzustellen, dass sie im Wechselspiel miteinander das simulierte Gaußsche Gesetz berücksichtigen. Dafür haben wir in unserer Arbeit eine Methode entwickelt, die das optische Gitter derart modifiziert, dass nur die erlaubten Zustände der Atome zur Evolution beitragen.

Dazu trennen wir gedanklich die gewollten physikalischen Konfigurationen im optischen Gitter, die das Gaußsche Gesetz erfüllen, von den anderen Zuständen, die in der gewünschten Theorie unphysikalisch sind. Diese ungewollten Zustände werden dann im Gitter mit einer zusätzlichen Energie belegt und damit effektiv gesperrt, da das System lokal zu wenig oder zu viel Energie besitzt, um diese Zustände einzunehmen. Dies wird durch ein zweites optisches Gitter der doppelten Wellenlänge erreicht, welches die Energie der geraden und ungeraden Gitterplätze unterscheidet, sowie durch präzises Einstellen des Wechselwirkungspotentials zwischen den Atomen. Die energetisch zugänglichen Zustände berücksichtigen damit das Gaußsche Gesetz, womit die Quantensimulation zur Eichtheorie wird.

Diese erlaubten Zustände und ihre Entsprechung in der Eichtheorie sind konkret in Abbildung 2 dargestellt. Hierbei ist essenziell, dass alle abgebildeten Zustände energetisch resonant sind. Das heißt, energetische Unterschiede zwischen erlaubten Konfigurationen dürfen nicht zu groß sein, sodass eine Zeitentwicklung zwischen ihnen stattfinden kann. In der „Vakuumkonfiguration“ – wegen der Abwesenheit von Ladungen passieren die Feldlinien das System ungehindert – haben die beiden sich gemeinsam auf einem ungeraden Gitterplatz befindenden Atome eine Wechselwirkungsenergie  $U$  (Abbildung 2 rechts unten). Diese wird lokal durch ein energetisches Anheben der geraden Gitterplätze mittels des zweiten optischen Gitters kompensiert. Werden diese nun in der „Ladungskonfiguration“ mit einem Teilchen-Paar auf benachbarten Gitterplätzen gefüllt – mit gleichzeitiger Anpassung des elektrischen Feldes dazwischen –, entspricht die Energie dieser simulierten Ladungsträger  $2\delta \approx U$ .

Um solche Übergänge zwischen den erlaubten Konfigurationen zu ermöglichen, nutzen wir die Energie-Zeit-Unschärfe der Quantenmechanik aus. Diese erlaubt es den Atomen, vom Gaußschen Gesetz verbotene Konfigurationen kurzzeitig, „virtuell“, einzunehmen. Damit können sie effektiv, durch einen kurzen Umweg über unphysikalische Zustände, zwischen den physikalischen Konfigurationen wechseln. Auf längeren Zeitskalen bleiben dann nur noch die eichinvarianten Prozesse beobachtbar, und somit wird eine Eichtheorie simuliert.

### Echtzeit-Dynamik und Thermalisierung

In unserer Arbeit benutzen wir dieses System, um die Dynamik dieser einfachen Eichtheorie zu untersuchen. Im Allgemeinen ist die genaue Beschreibung von Quantenfeldtheorien, wie eingangs erwähnt, kein einfaches Unterfangen. Oftmals unterscheidet man Szenarien im thermischen Gleichgewicht, das heißt Fragestellungen zu thermodynamischen Größen wie Temperatur, Druck oder Dichte einer Phase der Materie, von solchen außerhalb des Gleichgewichts, bei denen sich physikalische Systeme zeitlich entwickeln.

Sind Quantenfelder im thermischen Gleichgewicht, folgen ihre Schwingungsanregungen einer statistischen Boltzmann-Verteilung, in etwa analog zur Maxwell-Boltzmann-Verteilung der Geschwindigkeiten von Gasparkeln innerhalb der klassischen Thermodynamik. Für gewisse Quantenfeldtheorien ermöglicht dies eine effiziente statistische Beschreibung thermodynamischer Größen. Hierfür arbeiten viele Forschende mit Monte-Carlo-Simulationen, die auf besonders repräsentative Feldkonfigurationen zur Berechnung der thermischen Erwartungswerte zurückgreifen. Auf diese Weise können viele Gleichgewichtsaspekte der Teilchenphysik numerisch untersucht werden.

Diese Vorgehensweise scheidet jedoch fernab des Gleichgewichts. Dort kann eine solch effiziente statistische Beschreibung häufig nicht gefunden werden, womit Berechnungen ohne weitgreifende Näherungen häufig nicht durchführbar sind. Daher sind viele fundamentale dynamische Phänomene bisher noch nicht umfassend verstanden. Zum Beispiel beschäftigt sich die aktuelle Forschung mit Fragen nach der Ausbreitung von Information in quantenmechanischen Systemen, der Natur von Chaos in der Quantenmechanik, dem Transport von Erhaltungsgrößen wie Teilchenzahl oder Ladung – oder damit, ob und wie am Ende der Zeitentwicklung ein thermischer Zustand eingenommen wird, wenn das System isoliert von jeglichem thermischen Reservoir ist.

Diese Fragen haben große Relevanz im Kontext verschiedenster physikalischer Systeme, beispielsweise für unser Verständnis der Materie im frühen Universum, den Vorgängen in exotischen Materialien oder auch in Teilchenkollisionen, wie die am CERN untersuchten Zusammenstöße schwerer Atomkerne. Eine solche Kollision erzeugt einen energetisch extrem hochangeregten Zustand, bei dem die Kerne in ihre Grundbausteine aufgespalten werden, die

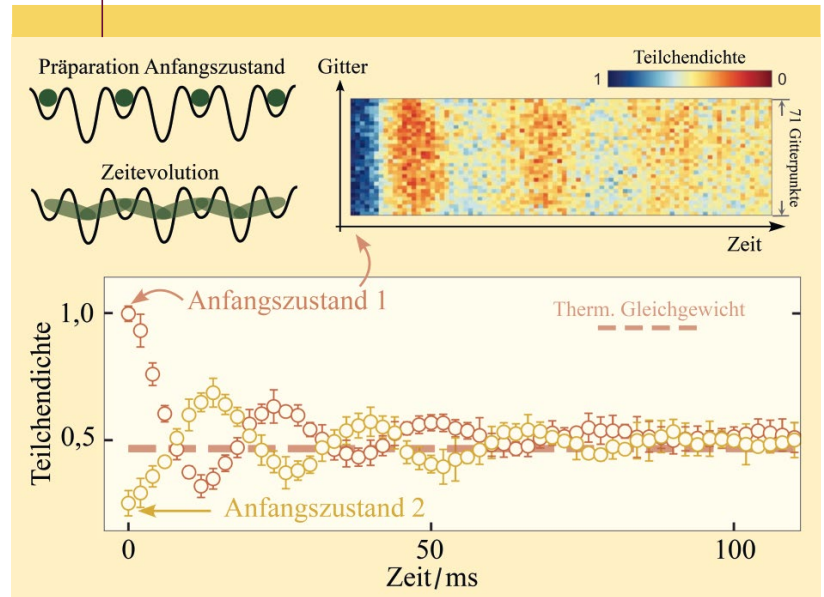
Quarks und Gluonen. Inwiefern dieses System infolge der Kollision ins thermische Gleichgewicht relaxiert und ein Quark-Gluon-Plasma formt, ist eine Frage gegenwärtiger Forschung. Ein Quantensimulator könnte hier Klarheit schaffen, indem eine solche Kollision im Tieftemperaturlabor kontrolliert und gezielt nachgestellt würde.

In unserer Arbeit haben wir ein Szenario fern des thermodynamischen Gleichgewichts für die oben beschriebene einfache Eichtheorie durchgespielt. Dazu verwenden wir ein Ensemble aus zirka 10 000 Rubidiumatomen in einem zweidimensionalen optischen Gitter, aus dem wir eine kleine zentrale Region zur Quantensimulation auswählen, um ein möglichst homogenes System zu erhalten. Hierbei ergeben sich lange eindimensionale „Ketten“ von mehr als 50 Atomen, wobei das Experiment in jeder solchen Kette separat und individuell zur Erlangung einer signifikanten Stichprobe durchgeführt wird. Dazu entfernen wir nun jedes zweite der Atome in jeder Kette, um einen Anfangszustand zu präparieren, der einer eichinvarianten, energetisch angeregten und mit Ladungen angereicherten Konfiguration entspricht (Abbildung 3). Danach stellen wir das optische Gitter so ein, dass die Dynamik der Atome nach den im vorigen Abschnitt diskutierten Gesetzmäßigkeiten der „vereinfachten“ Eichtheorie abläuft.

Als Konsequenz beobachten wir eine Oszillation der lokalen Teilchendichte in der Zeit, wobei sich nach ein paar Umläufen der gedämpften Schwingung ein stationäres Gleichgewicht einstellt. In unserer Arbeit nutzten wir numerische Computersimulationen, um diesen stationären Zustand zu untersuchen und mit dem thermischen Gleichgewicht zu vergleichen. Da der Quantensimulator stark von seiner Umgebung isoliert betrieben wird, ist die Energie im System weitgehend erhalten. Das heißt, es ist kein externes Wärmebad vorhanden, und ein etwaiges thermisches Ensemble der Eichtheorie müsste dieselbe Energie aufweisen wie unser Anfangszustand. Dieser Sachverhalt legt eine erwartete Temperatur für das Ensemble fest. Wir fanden, dass die Teilchendichte des Ensembles für diese Temperatur dem stationären Zustand des Experiments innerhalb der Unsicherheiten der Messung entsprach (Abbildung 3). Somit liegt der Schluss nahe, dass unser System, zumindest näherungsweise, infolge der Zeitentwicklung ins thermische Gleichgewicht übergegangen ist.

Innerhalb der gegebenen experimentellen Präzision fanden wir weiterhin: Für verschiedene Anfangszustände relaxiert das System bezüglich der Teilchendichte annähernd zu demselben thermischen Gleichgewicht, sofern diese Zustände die gleiche Anfangsenergie enthalten. Das System scheint also zu diesem Zeitpunkt die detaillierte Erinnerung an den Anfangszustand „vergessen“ zu haben. Die einzige Ausnahme ist die Temperatur, was der Erhaltungsgröße der Energie entspricht. Gibt es keine weiteren Erhaltungsgrößen im System, wäscht jede andere Information über den Anfangszustand effektiv aus. Dies kann als informationstheoretische Definition des thermischen Gleichgewichts gesehen werden: Thermische Systeme sind

ABB. 3 | THERMALISIERUNGS-DYNAMIK DER EICHTHEORIE



**Links oben:** Nach der Präparation des Anfangszustands wird das Experiment gestartet, und die Atome bewegen sich auf eichinvariante Weise durchs Gitter. **Rechts oben:** Die homogene lokale Teilchendichte der zur „Materie“ gehörigen Gitterplätze oszilliert in der Zeit. Ein Pixel entspricht zirka 1,5 Gitterplätzen. **Unten:** Die Teilchendichte nähert sich für verschiedene Anfangszustände mit gleicher Energie, jedoch unterschiedlicher Ladungskonfiguration, demselben Gleichgewichtszustand. Dieser entspricht innerhalb der experimentellen Unsicherheiten dem thermischen Gleichgewicht des Systems bei gleicher Energie (gestrichelte Linie) (aus [5], reprinted with permission from AAAS).

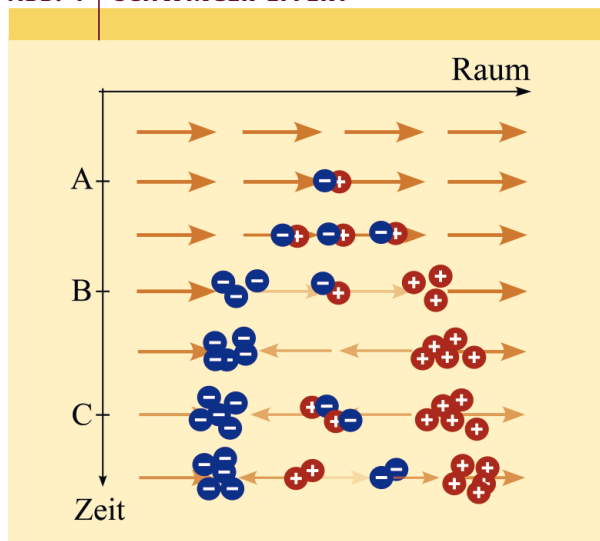
diejenigen, welche die geringste „Zustandsinformation“ beinhalten.

Allerdings begegnen wir hier einer fundamentalen Eigenschaft der Quantenmechanik, die besagt, dass Information während der Zeitevolution nicht zerstört, sondern lediglich umverteilt wird. Streng genommen bedeutet dies, dass ein perfekt isolierter Quantensimulator mit endlicher Anzahl von Gitterpunkten niemals exakt ins thermische Gleichgewicht übergehen kann [11]. Allerdings wird die Information über den Anfangszustand infolge der komplexen Zeitevolution typischerweise zu sehr detaillierten Beobachtungsgrößen hin „transportiert“, deren Beschreibung eine nahezu vollständige mikroskopische Theorie benötigt. Für makroskopische Beobachtungen hingegen äußert sich dieser Prozess als Dissipation – hier dominieren die statistischen, mittleren Eigenschaften der mikroskopischen Bestandteile, während das exakte Wissen über die präzisen mikroskopische Konfigurationen für allen praktischen Nutzen verloren ging. Folglich „thermalisieren“ makroskopische Größen effektiv, beispielsweise die gemittelten Teilchendichten, sogar in von der Umwelt isolierten Quantensystemen.

Eine solche Unterscheidung mikroskopischer und makroskopischer Prozesse ist jedoch nur in Vielteilchensystemen sinnvoll – kleinere Systeme evolvieren in der Regel zyklisch und zeigen keine anhaltende Relaxation zum Gleichgewicht. Aus diesem Grund erfordert eine Quanten-



**ABB. 4 | SCHWINGER-EFFEKT**



**Dynamische Produktion von Elektron-Positron-Paaren durch den Schwinger-Effekt. A) Ein starkes elektrisches Feld erzeugt Ladungspaare aus dem Vakuum. B) Die produzierten Ladungen werden durch das externe Feld beschleunigt und erzeugen daraufhin ein Gegenfeld, welches das ursprüngliche Feld abschirmt. C) Das Gegenfeld kann so stark werden, dass es das ursprüngliche Feld überkompensiert und erneut Ladungspaare produziert. Diese Rückkopplung zwischen elektrischen Ladungen und Feldern bestimmt die folgende komplexe Dynamik.**

simulation des Thermalisierungsverhaltens von Eichtheorien eine möglichst große Anzahl an Gitterplätzen. Um einen Schritt in diese Richtung zu gehen, verwendeten wir in unserer Arbeit experimentelle Daten mit bis zu 36 Atomen in optischen Gittern von 71 Gitterplätzen. Dieses Beispiel illustriert den Fortschritt der Quantensimulation von Gittereichtheorien allgemein: Vor wenigen Jahren begann dieses Forschungsfeld mit der Simulation einer Eichtheorie mit vier Gitterpunkten [12], heute gibt es weltweit mehrere Aufbauten, in denen eine deutlich höhere Anzahl an Freiheitsgraden zur Untersuchung komplexer Phänomene kontrolliert werden kann.

### Ausblick: Schwinger-Effekt

Darüber hinaus beinhalten Eichtheorien eine Vielzahl weiterer spannender Phänomene, die durch die enge Kopplung von Feld und Ladung, die das Gaußsche Gesetz erzwingt, entstehen. In der Quantenelektrodynamik zum Beispiel ist der sogenannte Schwinger-Effekt ein prominentes Phänomen fernab des thermischen Gleichgewichts. Dieser besagt, dass besonders starke elektrische Felder instabil sind – sie zerfallen, denn ihre Energie wird mit der Zeit in die Produktion von Materie und Antimaterie konvertiert, genauer gesagt von Paaren von Elektronen und Positronen. Julian Schwinger berechnete in den 1950er-Jahren die Rate an elektrischen Ladungspaaren, die auf diese Weise in elektrischen Feldern entstünden [13]. Jedoch konnte dieser Effekt bisher nicht direkt in der Natur nachgewiesen werden. Die hohen Feldstärken von etwa  $10^{18}$  V/m, die für

die Produktion beobachtbarer Mengen von Ladung notwendig wären, übersteigen die gegenwärtigen technischen Möglichkeiten, zum Beispiel ultrastarker Lasersysteme.

Genaue quantenmechanische Berechnungen des Phänomens sind sehr aufwendig, speziell Fragen zur Dynamik des Systems: Man erwartet, dass die produzierten Ladungspaare durch das starke elektrische Feld beschleunigt und gegensätzliche Ladungen räumlich voneinander getrennt werden. Dies induziert nach der Lenzschen Regel ein Gegenfeld, das selbst unter Umständen stark genug sein kann, erneut Teilchen zu produzieren. Dadurch kann eine Oszillation des elektrischen Feldes entstehen, die sich mehrfach wiederholen kann, bis das elektrische Feld irgendwann vollständig zerfallen ist. Die dann folgende Evolution, möglicherweise zum thermischen Gleichgewicht, könnte ähnlich der im obigen Experiment beschriebenen Zeitentwicklung erfolgen.

Dieser zeitabhängige Schwinger-Effekt könnte also im Prinzip in einem Quantensimulator nachgestellt werden, der dem im vorigen Abschnitt beschriebenen Experiment recht ähnlich ist. Allerdings benötigt das Phänomen eine detailliertere „Auflösung“ des elektrischen Feldes, das heißt, es genügt nicht, das elektrische Feld in obiger Weise durch lediglich zwei mögliche Zustände darzustellen. Man benötigt daher Ansätze, um beispielsweise viele Atome in einem Gitterplatz unterzubringen, deren große Anzahl lokaler Teilchenzahlzustände sich dann auf eine entsprechende Menge unterschiedlicher elektrischer Feldzustände übersetzen [14].

Für die Nachbildung dieses Phänomens in Quantensimulatoren ist entscheidend, dass die elektrische Feldstärke in dem Quantensimulator auf eine physikalisch verschiedene Größe abgebildet wird. Somit ist es im Quantensimulator prinzipiell möglich, die Dynamik der Eichtheorie in Gegenwart sehr hoher Feldstärken zu simulieren – auch wenn sie in dieser Stärke bisher nicht in der Realität erzeugt werden können. Darüber hinaus kann dieses Prinzip genutzt werden, um exotischere Parameterregimes zu untersuchen. Beispielsweise lässt sich die Stärke der Wechselwirkungen oder die Masse der Elementarteilchen modifizieren, um das Zusammenspiel der Grundkräfte noch tiefergründiger zu erforschen.

### Fazit

Die hier vorgestellten Überlegungen geben nur einen kleinen Einblick in die Welt der Quantensimulation. Trotz beeindruckender Fortschritte in den letzten Jahren bleiben Quantensimulationen von komplexen physikalischen Phänomenen in Eichfeldtheorien, wie des Schwinger-Effekts, eine große Herausforderung. Die Realisierung eines Quantensimulators erfordert ein hohes Maß an Kontrolle bei der Zusammensetzung der Atome als quantenmechanische Bausteine, speziell bei der Implementierung detaillierter Symmetrieeigenschaften, wie beim Gaußschen Gesetz der Eichtheorien. Nebst der Skalierung zu großen Simulatoren konzentriert sich die gegenwärtige Forschung auf verschie-

dene Strategien zur Implementierung der Eichinvarianz sowie deren Erweiterung auf höhere Dimensionen und komplexeren Eichtheorien, beispielsweise zur Untersuchung der schwachen und starken Kernkräfte.

Hierbei werden sowohl analoge Ansätze, wie der hier diskutierte, als auch digitale sowie hybride Verfahren verfolgt. Darüber hinaus sind grundlegende Fragen zur Korrektheit von Fehlern, die in einer Quantenrechnung in einem experimentellen Apparat auftreten, oder zur prinzipiellen Leistungsfähigkeit und Effizienz im Vergleich zu klassischen Rechnungen wichtige Gegenstände aktueller Forschung. Können solche und ähnliche Herausforderungen gemeistert werden, versprechen Quantensimulatoren tiefgreifenden praktischen Nutzen bei der Erforschung fundamentaler Fragen der Physik bezüglich des Aufbaus und der Entstehung der Materie. Auf der praktischen Anwendungsseite kann die Quantensimulation von komplexen Materialien oder Molekülen einen wichtigen Fortschritt für industrielle Prozesse bringen.

### Zusammenfassung

Quantensimulatoren versprechen die kontrollierte Untersuchung komplexer Fragestellungen auf verschiedenen Gebieten der Physik. Eine vielversprechende Forschungsrichtung ist dabei die Quantensimulation von Eichtheorien, die etwa die Grundkräfte der Natur im Standardmodell der Teilchenphysik verkörpern. Hierbei werden die quantenmechanischen Felder mithilfe kontrollierter Quantensysteme im Labor gezielt nachgestellt. Dieser Artikel stellt die analoge Quantensimulation von Eichtheorien anhand des Beispiels einer vereinfachten, eindimensionalen Form der Quantenelektrodynamik vor. Wir beschreiben die Implementierung von elektrischen Feldern und Ladungen mithilfe ultrakalter Atome in optischen Gittern und diskutieren Fragen der Zeitentwicklung und Thermalisierung des Quantenvielteilchensystems. Eine besondere Herausforderung ist hierbei die Implementierung der Eichinvarianz – die definierende Eigenschaft der Eichtheorien, welche zentral für deren besondere Eigenschaften ist. In Zukunft könnten Eichtheorie-Quantensimulatoren es uns ermöglichen, eine Reihe bisher unbeobachteter – und theoretisch ungelöster – Phänomene zu untersuchen. Ein Beispiel ist die volle quantenmechanische Dynamik des Schwinger-Effekts, der bei extrem hohen elektrischen Feldstärken die Paarerzeugung von Elektronen und Positronen vorhersagt.

### Stichwörter

Ultrakalte Atome, Quantensimulation, Quantenfeldtheorie, Eichtheorie, elektrisches Feld, Gaußsches Gesetz, Thermalisierung, Echtzeit-Dynamik, Zeitentwicklung, Schwinger-Effekt.

### Danksagung

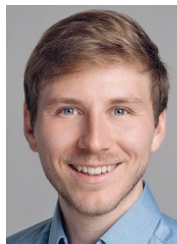
Die Autoren danken Torsten V. Zache für hilfreiche Kommentare zum Manuskript. P.H. acknowledges funding from Provincia Autonoma di Trento, and by Q@TN, the joint lab between University of

Trento, FBK-Fondazione Bruno Kessler, INFN-National Institute for Nuclear Physics, and CNR-National Research Council. This project has received funding from the European Research Council (ERC) under the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme (grant agreement No 804305) and was funded within the QuantERA II Programme that has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under Grant Agreement No 101017733 Funded by the European Union under Horizon Europe Programme – Grant Agreement 101080086 – NeQST. Views and opinions expressed are, however, those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union, European Commission, European Climate, Infrastructure and Environment Executive Agency (CINEA), nor any other granting authority. Neither the European Union nor any granting authority can be held responsible for them. R.O. was supported by the European Union's Horizon Europe research and innovation program under Grant Agreement No. 101113690 (PASQuans2.1).

### Literatur

- [1] M. Böhm, W. Hollik, Phys. Unserer Zeit **1979**, 10, 19.
- [2] P. Windpassinger, Phys. Unserer Zeit **2014**, 45, 26.
- [3] D. Jaksch, T. Calarco, P. Zoller, Phys. Unserer Zeit **2000**, 31, 260.
- [4] V. Saggio, P. Walther, Phys. Unserer Zeit **2022**, 53, 80.
- [5] N. Linke, M. Müller, Phys. Unserer Zeit **2020**, 51, 168.
- [6] B. Yang et al., Nature **2020**, 587, 392.
- [7] Z.-Y. Zhou et al., Science **2022**, 377, 311.
- [8] C. Gatteringer, Phys. Unserer Zeit **2004**, 35, 227.
- [9] M. Greiner, T. W. Hänsch, I. Bloch, Phys. Unserer Zeit **2002**, 33, 51.
- [10] H. J. Rothe, Lattice Gauge Theories: An Introduction, 4th ed. World Scientific, Singapur 2012.
- [11] A. Polkovnikov, D. Sels, Science **2016**, 353, 752.
- [12] E. A. Martinez et al., Nature **2016**, 534, 516.
- [13] J. Schwinger, Phys. Rev. **1951**, 82, 664.
- [14] V. Kasper et al., Phys. Lett. B **2016**, 760, 742.

### Die Autoren



Robert Ott studierte Physik an der Universität Heidelberg und promovierte dort 2022 zur Quantensimulation fernab des Gleichgewichts mit ultrakalten Atomen. Gegenwärtig arbeitet er als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Theoretische Physik der Universität Innsbruck.  
(Foto: S. Lencinas.)



Philipp Hauke studierte Physik an der Technischen Universität München und promovierte 2013 am Institut de Ciències Fotòniques in Barcelona zur Quantensimulation mit ultrakalten Atomen in optischen Gittern. Nach weiteren Forschungsaufenthalten an den Universitäten Innsbruck und Heidelberg wurde er 2019 als Professor an die Universität Trento berufen, wo er einen Lehrstuhl zur Theorie von Quantentechnologien leitet.  
(Foto: P. Benjamin.)

### Anschrift

Dr. Robert Ott, Institut für Theoretische Physik der Universität Innsbruck, 6020 Innsbruck, Österreich, E-Mail: robert.ott@uibk.ac.at  
Prof. Dr. Philipp Hauke, Pitaevskii BEC Center and Department of Physics, University of Trento, 38123 Trento, Italy, E-Mail: philipp.hauke@unitn.it