

# Wie Quantensimulatoren neue Antworten geben können

## Bestimmung der effektiven Quantentheorie

Markus Oberthaler

Eine der großen Errungenschaften der theoretischen Physik besteht darin, aus einer mikroskopischen Beschreibung das Verhalten in der makroskopischen Welt vorherzusagen zu können. Entscheidend ist der Übergang von mikroskopischen Details zu den relevanten beobachtbaren Größen im Grenzfall unendlich vieler Freiheitsgrade. Dieser Limes ist Grundlage der quantenfeldtheoretischen Beschreibung unserer Natur.

Die Theorie zur Beschreibung der makroskopischen Welt wird oft als effektiv bezeichnet, weil sie nicht mehr alle Details beinhaltet. Sie erlaubt es aber, alle möglichen beobachtbaren Erwartungswerte vorherzusagen. Das ist äquivalent zum Wissen der Erwartungswerte aller Korrelationen zwischen verschiedenen Raum-Zeit-Punkten des beschreibenden Feldes (Ordnungsparameters). Die Herausforderung besteht darin, die Korrelationen minimal redundant zu erfassen

und aus einer zugrundeliegenden mikroskopischen Theorie auf verschiedenen Längen- bzw. Energieskalen herzuleiten. Auch wenn die effektiven Theorien mittels Renormierungsgruppentheorie systematisch herzuleiten sind, ist dies für realistische Systeme nur näherungsweise möglich.

Hier lassen Quantensimulatoren hoffen: Eine aktuelle Arbeit von Torsen Zache und Kollegen zeigt einen Weg, die emergenten effektiven Theorien mithilfe eines Quantensimulators experimentell zu bestimmen [1]. Dazu gilt es, die grundlegenden Bausteine der Korrelationen zu ermitteln, was mit dem vorgestellten Vorgehen in verschiedenen physikalischen Systemen bzw. Quantensimulator-Plattformen möglich ist. Damit eröffnet diese Arbeit neue Perspektiven, um Quantensimulatoren weitere fundamentale Ergebnisse zu entlocken.

Der wesentliche Schritt besteht darin, eine Formulierung der Quantenfeldtheorie zu verwenden, die auf gleichzeitigen Korrelationen (equal-time) beruht und damit nicht der Lehrbuchversion folgt, in der Korrelationen in Zeit und Raum notwendig sind. Für den Lehrbuchfall wären auch Zeit-Zeit-Korrelationen experimentell zu extrahieren. Das ist allerdings schwierig, da projektive Messungen unmittelbar auf das System zurück wirken. Zwar existieren theoretische Vorschläge, um diese Zeit-Zeit-Korrelationen experimentell zu bestimmen [2], aber deren experimentelle Umsetzung gelang bislang nicht. Die equal-time-Formulierung der Quantenfeldtheorie macht diese komplexen Messungen aber hinfällig und ist direkt auf die existierenden Quantensimulator-Plattformen anwendbar.

Christof Wetterich [3] und Herbert Nachbagauer [4] haben die equal-time-Formulierung der Quantenfeldtheorie 1997 eingeführt. Von experimentellen Quantensimulatoren war noch keine Rede [3]: „A better understanding of the impact of trun-

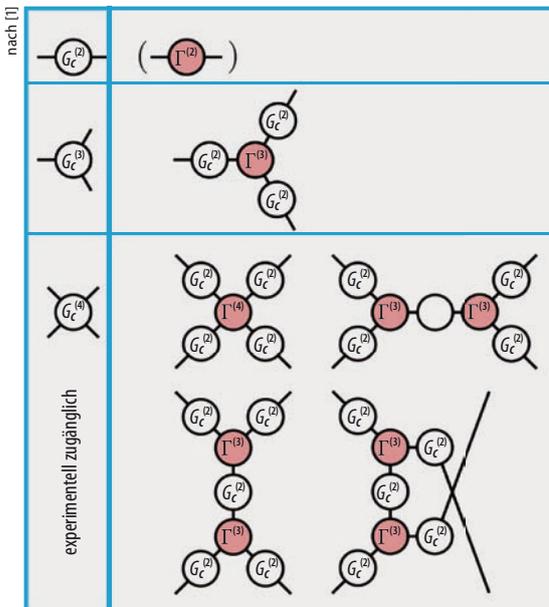
cations will be critical for the practical use of the present [Anm.: equal-time] formalism.“ Die aktuelle Arbeit zeigt, dass diese Formulierung einen natürlichen und mächtigen Zusammenhang zwischen Quantenfeldtheorie und Quantensimulatoren herstellt.

Ziel ist es, die minimal-redundanten Korrelationen zu erfassen [1]. Eine grundlegende, nicht triviale Korrelation ist der Zusammenhang der Feldwerte  $\varphi(x)$  an zwei Orten:

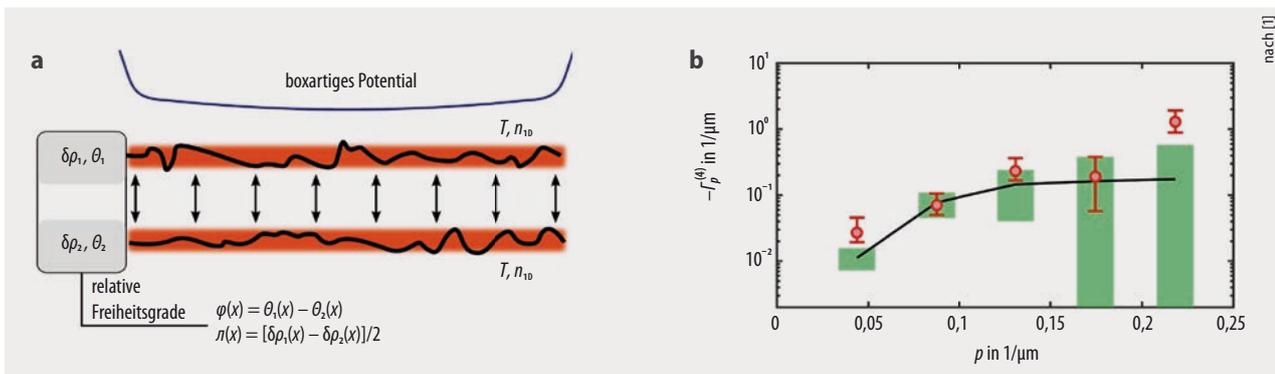
$$G_c^{(2)}(x_1, x_2) = \langle \varphi(x_1) \varphi(x_2) \rangle - \langle \varphi(x_1) \rangle \langle \varphi(x_2) \rangle,$$

wobei das Mittel im Experiment über viele Realisierungen zu verstehen ist. Im Allgemeinen zeigt ein physikalisches System auch Korrelationen zwischen mehreren Raumpunkten  $x_1, x_2, \dots, x_n$ . Diese Informationen lassen sich systematisch aus den Zwei-Punkt-Korrelationen zusammensetzen (Abb. 1). Somit ist es immer möglich,  $n$ -Punkt-Korrelationen  $G_c^{(n)}$  mit Zwei-Punkt-Korrelationen  $G_c^{(2)}$  zu verbinden und damit die nicht-trivialen Ein-Teilchen-irreduziblen (1PI-) Korrelationen  $\Gamma^{(n)}$  zu definieren. Die  $\Gamma^{(n)}$  bestimmen die effektive Theorie, lassen sich aber nur schwer aus der mikroskopischen Beschreibung herleiten. Sie sind auch als Entwicklungskoeffizient der funktionalen Taylor-Entwicklung des erzeugenden Funktionals für Korrelationsfunktionen zu verstehen [1].

Ein zentrales Ergebnis ist ein Rezept, um die grundlegenden 1PI-Korrelationen experimentell zu extrahieren. Wesentlich ist die Beobachtbarkeit der räumlichen Zwei- und Vier-Punkt-Korrelationen des relevanten Feldes (Ordnungsparameters) zum gleichen Zeitpunkt. Das kann im allgemeinen Fall schwierig sein, aber für das gewählte Beispiel der Autoren reduziert sich das auf ein reellwertiges skalares Feld. In guter Näherung ist das gewählte experimentelle System von zwei tunnelgekoppelten ein-



**Abb. 1** Feynman-Diagramme zeigen, wie connected-Korrelationsfunktionen  $n$ -ter Ordnung  $G_c^{(n)}$  mit den Zwei-Punkt-Korrelationen  $G_c^{(2)}$  und den Ein-Teilchen-irreduziblen Korrelationen  $\Gamma^{(n)}$  zusammenhängen. Die  $n$ -Punkt-Korrelationen des relevanten Feldes sind messbar. Die effektive Theorie wird mit 1PI-Korrelationen (rote Kreise) beschrieben, die aus den Messungen rekonstruierbar sind.



**Abb. 2** Zwei eindimensionale Bose-Kondensate werden in einem Box-Potential realisiert (a) und sind über eine Tunnelbarriere verbunden. (b) zeigt die extrahierten  $r^{(4)}$  des Phasenfeldes  $\varphi$  für eine gegebene Tunnelkopplung. Die roten Punkte sind die experimentell extrahierten Werte. Die schwarze Linie zeigt die Vorhersage der Theorie basierend auf  $10^6$  Simulationen. Die grünen Balken geben die statistische Relevanz der Simulationen (80 % Konfidenzintervall) bei Begrenzung auf die Zahl der experimentellen Realisierungen (ca. 1000) an.

dimensionalen Bose-Gasen als Implementierung des Sine-Gordon-Modells anzusehen [5]. Für diese spezielle Frage wurde ein eindimensionales, boxartiges Potential mit einer Ausdehnung von  $75 \mu\text{m}$  implementiert (Abb. 2a). Das System wird durch langsames Verdampfungskühlen nahe des thermischen Gleichgewichts präpariert. Die grundlegenden Größen sind die Teilchenzahldifferenz und das konjugierte Feld der Phasendifferenz (Phasenfeld). In der Arbeit wird das Phasenfeld mittels Interferenz nach der Expansion der Bose-Gase extrahiert und dessen räumliche Zwei- und Vier-Punkt- sowie IPI-Korrelationen analysiert und mit den theoretischen Erwartungen verglichen.

Qualitativ zeigen die experimentellen Ergebnisse das erwartete Verhalten

(Abb. 2b) und legen nahe, dass die effektive Theorie für endliche Temperatur aus den experimentellen Daten zu extrahieren ist. Der experimentelle Aufwand dafür ist allerdings hoch. So muss die Zahl der Realisierungen ausreichen, um statistische Signifikanz der Vier-Punkt-Korrelationen zu garantieren (Abb. 2b, grüne Balken). Zudem beschreibt die extrahierte effektive Wirkung das endliche, „nur“  $75 \mu\text{m}$  große System und erlaubt es daher nur bedingt, die erwartete Impulsabhängigkeit der IPI-Korrelationen im unendlich ausgedehnten System zu bestätigen.

Diese Arbeit eröffnet einen Weg, theoretische Vorhersagen der Quantenfeldtheorie quantitativ zu testen. Dabei lassen sich direkt die grundlegenden Bausteine der Quan-

tenfeldtheorie vergleichen. Die Methodik ist auf verschiedene experimentelle Plattformen anwendbar und zeigt damit einen vielversprechenden Weg auf, wie grundlegende Fragen der Physik, etwa die Emergenz von effektiven Theorien, mittels Quantensimulatoren zu beantworten sind.

- [1] T. Zache et al., Phys. Rev. X **10**, 011020 (2020)
- [2] M. Knap et al., Phys. Rev. Lett. **111**, 147205 (2013)
- [3] C. Wetterich, Phys. Rev. E **56**, 2687 (1997)
- [4] H. Nachbagauer, arXiv:hep-th/9703105
- [5] T. Schweigler et al., Nature **545**, 323 (2017)

## Autor

**Prof. Dr. Markus Oberthaler**, Kirchhoff-Institut für Physik, Im Neuenheimer Feld 227, 69120 Heidelberg

## 60 Jahre Laser

Am 16. Mai 1960 realisierte Theodore Maiman den ersten Laser. Seitdem hat der Laser nicht nur die Grundlagenforschung revolutioniert, sondern unzählige Anwendungen erobert bzw. erst ermöglicht. Kürzlich ist es zwei Forschern aus Hannover gelungen, einen Dioden-gepumpten, kontinuierlichen Rubinlaser zu realisieren. Einen solchen Rubinlaser erhielt der deutsche Laserpionier Herbert Welling von seinen zwei Schülern zum 90. Geburtstag überreicht. Angeregt von Theodor Maiman hatte Welling versucht, die natürliche Linienbreite des Rubinlasers in Hannover zu messen. Doch schnell war klar, dass dafür ein kontinuierlicher Rubinlaser nötig war – dieser wurde nun Wirklichkeit.

W. Luhs und B. Wellegehausen, OSA Continuum **2**, 184 (2019), vgl. den Schwerpunkt im Physik Journal, Juli 2010.

