

PHYSIK konkret

Die Essenz der Quantenmechanik

- Quantenmechanik ist anders als klassische Physik.
- Die Grundgesetze der Quantenmechanik sind vollkommen verstanden und können gezielt genutzt werden.
- Die Möglichkeiten der Quantenmechanik sind darüber hinaus bisher nicht abzusehen.

Die Quantenmechanik bildet die Grundlage für unser Verständnis der physikalischen Natur der Dinge. Quantenphänomene ermöglichen weitreichende praktische Anwendungen¹ – wie zum Beispiel Computerchips, die Photovoltaik, die stabilsten Uhren, das neue Einheitensystem² und die präzise Messungen. Dabei ist die Quantenmechanik anders als die vertraute klassische Physik. Sie unterscheidet sich wesentlich von unseren alltäglichen Erfahrungen. Doch worin genau? Diese Frage lässt sich auch jenseits von mathematischen Formalismen oder Interpretationen beantworten – ausschließlich anhand messbarer Phänomene.

Die Quantenmechanik beschreibt die fundamentalen Regeln von Quantensystemen. Kernmerkmal der Quantenmechanik ist die intrinsische Zufälligkeit: Die Ergebnisse von einzelnen Messungen an solchen Systemen sind nicht eindeutig festgelegt. Die Theorie liefert zwar exakt

die Wahrscheinlichkeiten der Ergebnisse, das konkrete Ergebnis der jeweiligen Einzelmessung jedoch ist vorab unbekannt. So baut sich z. B. aus einer Vielzahl von Einzelereignissen ein Interferenzbild auf, was eine spezifische Unschärfe besitzt und gleichzeitig den Wellenaspekt von Quantensystemen widerspiegelt (siehe Abb.). Im Gegensatz zur klassischen Unschärfe, die durch Messungenauigkeiten entsteht und durch Verbesserung der Messtechnik reduziert werden kann⁴, ist diese Zufälligkeit von fundamentaler Natur und legt genau fest, was grundsätzlich nicht vorhersagbar ist. Diese Eigenschaft bildet unter anderem die Basis der Quantenkryptographie und somit der prinzipiell absolut sicheren Informationsübertragung. Auch der Tunneleffekt⁵, bei dem Quantensysteme Barrieren durchdringen, zeigt diese quantenmechanische Natur: Zwar gibt es klassische Analogien, etwa in der Wellenoptik⁶, doch die beobachtete zeitliche Zufälligkeit des Tunnelns einzelner Quantensysteme, wie beim radioaktiven Zerfall, ist rein quantenmechanisch bedingt⁷. Ebenso ist die Nichtverträglichkeit von Messungen, das heißt, dass sich Messungen von zwei Größen wie Ort und Impuls gegenseitig stören, ein rein quantenmechanisches Phänomen, welches die Heisenbergsche Unschärfe erzwingt.

Ein weiteres Merkmal der Quantenmechanik ist das Paulische Ausschließungsprinzip: Zwei Elementarteilchen mit halbzahligem Spin (wie z. B. Elektro-

„Erst der Unterschied zur klassischen Physik gibt der Quantenmechanik ihr unabschätzbar großes wissenschaftliches und technologisches Potential.“



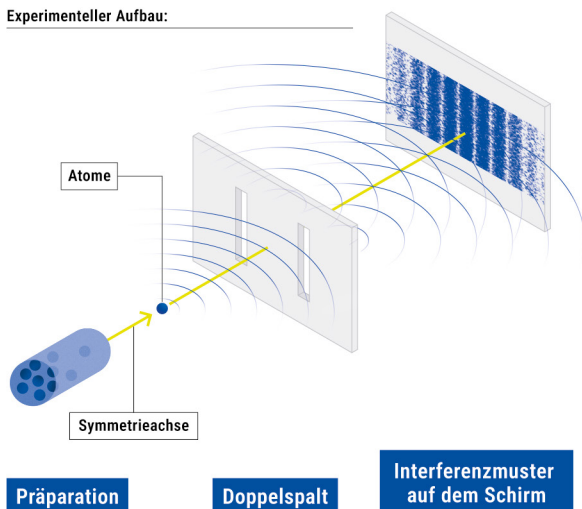
Klaus Richter
Vize-Präsident der Deutschen Physikalischen Gesellschaft e. V.

nen) können nicht denselben Quantenzustand einnehmen. Dieses Prinzip ermöglicht unsere Existenz: Es stabilisiert Atome, Materie und damit unsere Erde sowie Sterne, die sonst kollabieren würden.

Bei zusammengesetzten Quantensystemen in sogenannten verschränkten Zuständen passiert etwas Unerwartetes: Durch das zufällige Ergebnis der Messung des einen Teilsystems wird das Messergebnis für das andere Teilsystem eindeutig festgelegt. Mit einer Messung bestimmt man also gleich zwei Zustände. Die beiden Teilsysteme, die weit voneinander entfernt sein können, hängen daher viel stärker zusammen, als es Systeme aus unserer klassischen Alltagswelt können. Diese Quantenkorrelationen können in modernen Quanteninformationstechnologien genutzt werden⁸.

Zusammengefasst sagt die Quantenmechanik statistische Mittelwerte voraus, legt aber gleichzeitig eindeutig fest, was bei Einzelmessungen unbestimmt bleibt. Zufälligkeit, Pauli-Prinzip, Nichtverträglichkeit von Messungen und Verschränkung sind Phänomene ohne Entsprechung in der klassischen Physik. Darin liegt die Essenz der Quantenmechanik, aber auch Grundlage und Potential für neue Effekte. Sie ist damit nicht nur zentrales Fundament der modernen Physik, sondern auch Treiber für Technologien wie Quantenkommunikation und -kryptographie, Quantensensorik und Quantencomputer. Bisher wurde vermutlich nur ein kleiner Teil aller Möglichkeiten der Quantenmechanik erforscht. Auch reicht unsere durch die klassische Welt geformte Intuition nicht aus, neue Quanteneffekte vorauszuahnen. Das Potential in der Entwicklung neuer Quantentechnologien ist daher auch 100 Jahre nach der Geburtsstunde der Quantenmechanik riesig.

Experimenteller Aufbau:



Beobachtung:



➤ Das Interferenzbild baut sich aus Einzelmessungen auf. Eine Einzelmessung am Quantensystem, hier die Detektion des Atoms auf dem Schirm (rechts), erzeugt auf diesem einen Punkt, dessen Lage nicht vorhergesagt werden kann. Die Punkte fügen sich für viele Messungen zu einem Interferenzbild zusammen. Derartige Interferenzexperimente sind heutzutage auch mit aus sehr vielen Atomen bestehenden Molekülen und Nanoteilchen möglich³.

Fußnoten und Quellen

- ¹ Siehe Physik konkret Ausgaben 37–41.
- ² Siehe Physik konkret Ausgabe 34.
- ³ Die Quantenmechanik besitzt keine intrinsischen Parameter, die diese auf eine gewisse Größe oder Masse (oder Ladung, Spin oder weitere Parameter) beschränkt. Quantensysteme können über große Distanzen existieren (z. B. verschränkte Systeme) und alle bisherigen Experimente haben keine Massengrenze gezeigt [z. B. S. Pedalino, B.E. Ramirez, R. Ferstl, K. Hornberger, M. Arndt, S. Gerlich, Probing quantum mechanics with nanoparticle matter-wave interferometry, Nature 649 8098 (2026), doi:10.1038/s41586-025-09917-9].
- ⁴ Siehe Physik konkret Ausgabe 77.
- ⁵ Nobelpreis 2025, siehe Physik konkret Ausgabe 75.
- ⁶ Zum Beispiel der Goos-Hänchen Effekt [F. Goos, H. Hänchen: Ein neuer und fundamentaler Versuch zur Totalreflexion. Annalen der Physik 436, 333 (1947), doi:10.1002/andp.19474360704] und die frustrierte interne Totalreflexion [F. J. Duarte, & L. W. Hillman: Frustrated total internal reflection: A tutorial, Optics and Laser Technology 21, 87–92, (1989), doi:10.1016/0030-3992(89)90014-4].
- ⁷ Wenn man statistisch z. B. die Halbwertszeit bestimmt hat, dann ist es bei jedem zukünftigen Zerfall absolut zufällig, ob das Atom vor oder nach der Halbwertszeit zerfällt. Hier hat die Zufälligkeit einen anderen physikalischen Grund als die Zufälligkeit bei z. B. Spin-Messungen.
- ⁸ Siehe Physik konkret Ausgabe 64.

Die DPG dankt ihrem Autor:

· **Claus Lämmerzahl**

DPG Vorstandsmitglied Öffentlichkeitsarbeit, Universität Bremen

Über uns



Die **Deutsche Physikalische Gesellschaft e. V. (DPG)**, deren Tradition bis in das Jahr 1845 zurückreicht, ist die älteste und, gemessen an der Zahl ihrer Mitglieder, auch die größte nationale physikalische Fachgesellschaft der Welt. Sie versteht sich als offenes Forum für Physiker:innen und möchte der Physik eine Stimme geben. Als gemeinnütziger Verein verfolgt sie keine wirtschaftlichen Interessen. Abiturient:innen, Studierende und Lehrkräfte sind in der DPG ebenso vertreten wie Lehrende und Forschende aus der Universität und Fachkräfte aus der Industrie.

Weltberühmte Wissenschaftler waren Präsidenten der DPG – so Max Planck und Albert Einstein. Mit Tagungen und wissenschaftlichen Publikationen fördert die DPG den Gedankenaustausch innerhalb der wissenschaftlichen Gemeinschaft. Physikalische Spitzenleistungen würdigt sie mit Preisen von internationaler Reputation. Die DPG motiviert mit Physikwettbewerben den naturwissenschaftlichen Nachwuchs und zeichnet – für herausragende Physikleistungen im Abitur – bundesweit

Schülerinnen und Schüler aus. Sie engagiert sich auch in politischen Diskussionen: Themen wie Bildung, Forschung und Klimaschutz stehen dabei im Mittelpunkt.

Sitz der DPG ist das Physikzentrum Bad Honnef, welches auch Tagungsstätte der DPG und Treffpunkt für Wissenschaftler:innen aus aller Welt ist. In Berlin unterhält die DPG ihre Hauptstadtrepräsentanz zur Vernetzung mit Akteur:innen aus Politik und Gesellschaft. Für alle Interessierten finden dort regelmäßig wissenschaftliche Gesprächsrunden und Vorträge statt.

Die DPG macht Physik öffentlich: Mit populärwissenschaftlichen Publikationen und öffentlichen Veranstaltungen beteiligt sie sich aktiv am Dialog zwischen Wissenschaft und Öffentlichkeit, anlassbezogen auch gemeinsam mit anderen Wissenschaftsorganisationen. Zentrales Anliegen ist es, allen Neugierigen einen Zugang zur Physik zu schaffen.

