

**Spektrum**  
der Wissenschaft

15.23

**KOMPAKT**

# TEILCHENPHYSIK

**Grundlagen**

Was ist ein Teilchen?

**Quantenfeldtheorie**

Die Grundkräfte der Welt

**Relativitätstheorie**

Teilchen aus dem Nichts



Mike Zeitz  
E-Mail: [zeitz@spektrum.de](mailto:zeitz@spektrum.de)

## Liebe Mitexistierende,

schon in der Schule lernen wir, dass jegliche Materie aus diversen Atomsorten aufgebaut ist, alle fein säuberlich nach messbaren chemischen und physikalischen Eigenschaften im Periodensystem aufgereiht. In ihren Kernen Protonen und Neutronen, umkreist von Elektronen. Aber dann? Hier endet das Lehrbuchwissen. Sobald wir zu noch kleineren Skalen vordringen, zu den punktförmigen Elementarteilchen oder gar in das scheinbare Nichts im Raum zwischen ihnen, stürzen wir in einen schier bodenlosen Kaninchenbau. Das Reich des Allerwinzigsten mutet mitunter absurd an. Im Vakuum brodeln ungeheure Energien, und die Spielregeln wechseln je nach Betrachtungsweise und scheinen überhaupt nur zu funktionieren, wenn man nicht allzu genau hinschaut. Doch irgendwie muss sich diese paradoxe Märchenwelt begreifen lassen – denn schließlich bringt sie am Ende unseren geordneten Alltag hervor.

Einen vergnüglichen Weg ins Wunderland und zurück wünscht Ihnen

Erscheinungsdatum dieser Ausgabe: 17.04.2023

**CHEFREDAKTION:** Dr. Daniel Lingenhöhl (v.i.S.d.P.)

**CREATIVE DIRECTOR:** Marc Grove

**LAYOUT:** Oliver Gabriel, Marina Männle

**SCHLUSSREDAKTION:** Christina Meyberg (Ltg.),

Sigrid Spies, Katharina Werle

**BILDREDAKTION:** Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe

**REDAKTION:** Antje Findeklee, Dr. Michaela Maya-Mrschtik

**VERLAG:** Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH,

Tiergartenstr. 15–17, 69121 Heidelberg, Tel.: 06221 9126-600,

Fax: 06221 9126-751; Amtsgericht Mannheim, HRB 338114,

USt-IdNr.: DE229038528

**GESCHÄFTSLEITUNG:** Markus Bossle

**ASSISTENZ GESCHÄFTSLEITUNG:** Stefanie Lacher

**MARKETING UND VERTRIEB:** Annette Baumbusch (Ltg.),

Michaela Knappe (Digital)

**LESER- UND BESTELLSERVICE:** Helga Emmerich, Estefanny Espinosa de

Rojas, Sabine Häusser, Tel.: 06221 9126-743, E-Mail: [service@spektrum.de](mailto:service@spektrum.de)

**BEZUGSPREIS:** Einzelausgabe € 4,99 inkl. Umsatzsteuer

**ANZEIGEN:** Wenn Sie an Anzeigen in unseren Digitalpublikationen interessiert sind, schreiben Sie bitte eine E-Mail an [anzeigen@spektrum.de](mailto:anzeigen@spektrum.de).

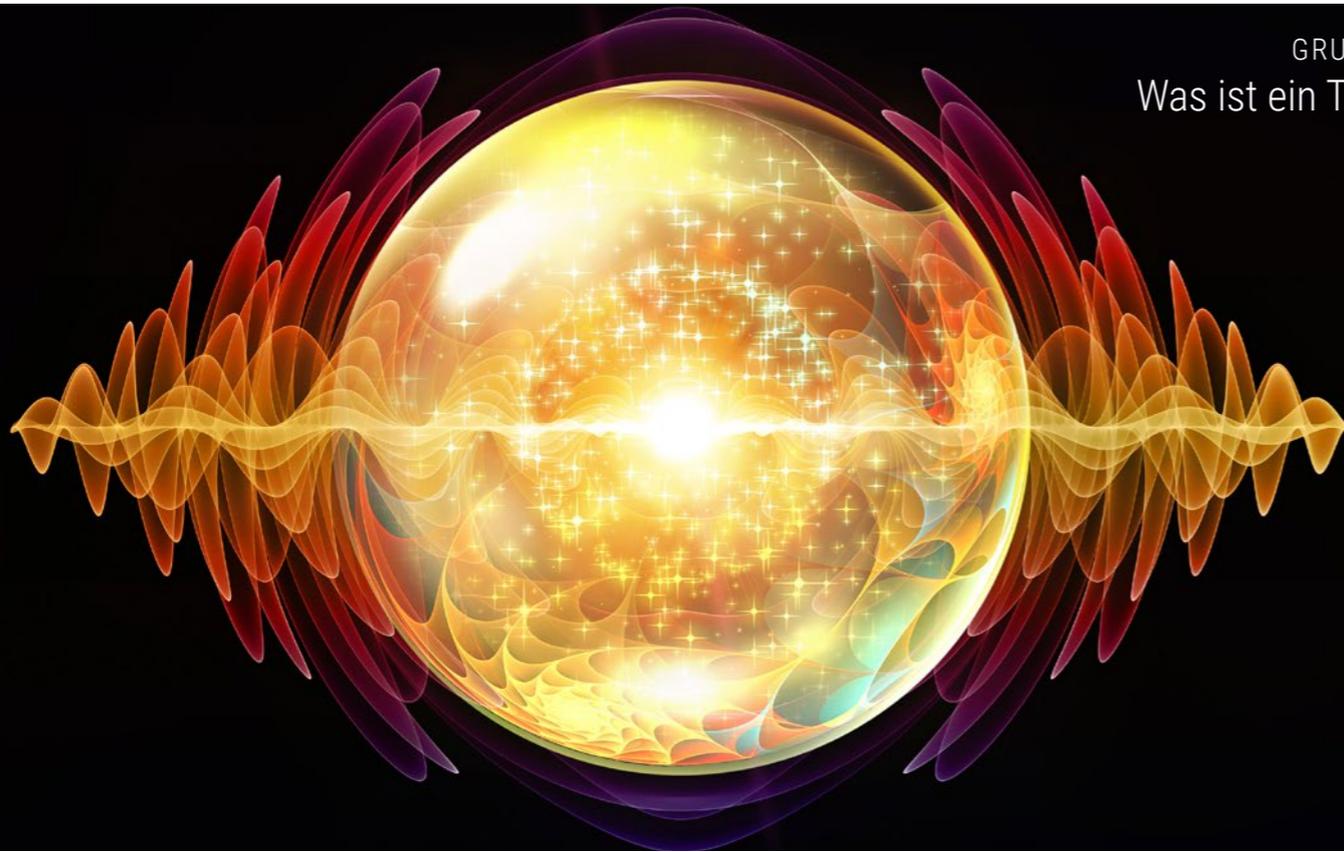
Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des Verlags unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt den Verlag zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2023 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg. Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.

Folgen Sie uns:



SEITE  
04

GRUNDLAGEN  
Was ist ein Teilchen?



ISTOCK / AGSANDREW

SEITE  
15

INFOGRAFIK  
Ein neues Bild der  
Teilchen und Kräfte



SAKKIMSTERKE / GETTY IMAGES / ISTOCK

QUANTENFELDTHEORIE  
Die Grundkräfte  
der Welt

SEITE  
22



KASEZO / GETTY IMAGES / ISTOCK

RELATIVITÄTSTHEORIE  
Teilchen aus dem Nichts

SEITE  
35



HORDIEIEV ROMAN / GETTY IMAGES / ISTOCK

- 04 GRUNDLAGEN  
Was ist ein Teilchen?
- 15 INFOGRAFIK  
Ein neues Bild der Teilchen  
und Kräfte
- 22 QUANTENFELDTHEORIE  
Die Grundkräfte der Welt
- 35 RELATIVITÄTSTHEORIE  
Teilchen aus dem Nichts
- 52 REZENSION  
»Was macht das Quark  
im Apfelkuchen?«

GRUNDLAGEN

# WAS IST EIN TEILCHEN?

von Natalie Wolchover

Zur grundlegenden Natur der kleinsten Bausteine der Welt gibt es zahlreiche Hypothesen: Sie könnten punktartige Objekte sein, schwingende Felder – oder Einblicke in eine mathematische Ordnung des Kosmos gewähren. Theoretiker ringen heute intensiver als je zuvor um das sinnvollste Konzept.

**A**lle Erscheinungen im Universum lassen sich auf Teilchen und die Wechselwirkungen zwischen ihnen zurückführen. Angesichts dessen ist die Frage naheliegend, was genau Teilchen eigentlich sind.

Die einfachste Antwort erweist sich schnell als unbefriedigend. Nämlich, dass Elektronen, Photonen, Quarks und die übrigen fundamental genannten Objekte keine Substruktur oder räumliche Ausdehnung mehr besitzen. Mary Gailard von der University of California in Berkeley, die in den 1970er Jahren die Massen zweier Arten von Quarks vorhersagte, fasst die Perspektive heute so zusammen: »Wir stellen uns Teilchen im Wesentlichen als punktförmige Objekte vor.« Und doch haben sie unterschiedliche Eigenschaften wie Ladung und Masse. Wie soll ein dimensionsloser Punkt etwas wiegen? Der Theoretiker Xiao-Gang Wen vom Massachusetts Institute of Technology in Cambridge bekräftigt:

»Zu behaupten, Teilchen seien fundamental, ist nur eine andere Art, zu sagen: ›Fragen Sie bitte nicht weiter, ich weiß keine Antwort!‹«

Die Eigenarten jedes physikalischen Objekts hängen von dessen Beschaffenheit ab, also letztendlich von seinen kleinsten Bestandteilen. Deren Charakter wiederum lässt sich nur noch mit Zahlen und Gleichungen beschreiben. Somit spannen die Teilchen zwischen der gewohnten Wirklichkeit und der abstrakten Mathematik gewissermaßen eine Brücke – die auf einem unsicheren Fundament ruht.

Bei der Recherche für diesen Artikel offenbarten Experten bei ihrer jeweiligen Antwort auf die Frage, was ein Teilchen ist, bemerkenswert unterschiedliche Herangehensweisen. Viele betonten jedoch, ihre Einlassungen seien eigentlich gar nicht so widersprüchlich. Vielmehr würden sie lediglich verschiedene Facetten der Wahrheit beleuchten. Es kristallisieren sich außerdem zwei wesentliche Stoßrichtungen in der modernen Grundlagenforschung heraus, die zu einem befriedigenderen und umfassenderen Bild

AUF EINEN BLICK

## Dickicht aus Ansätzen

**01** Physiker haben diverse Herangehensweisen entwickelt, um die fundamentalen Objekte der Welt zu verstehen. Noch ist offen, welcher Blickwinkel der vielversprechendste ist.

**02** In der Vergangenheit führte der Weg von Wellenfunktionen über quantisierte Felder und gruppentheoretische Überlegungen bis hin zur Stringtheorie. Stets sind Probleme aufgetaucht.

**03** Viele Hoffnungen ruhen auf zwei jüngeren Strategien: Einige Theoretiker wollen Strukturen aus abstrakter Information herleiten; andere betrachten die Teilcheninteraktionen völlig neu.