

# INHALT

## GRUNDLEGENDE KONZEPTE

Viele Vorgänge auf kleinster Ebene laufen der alltäglichen Erfahrung zuwider. Immerhin fußen die Phänomene auf klaren mathematischen Grundlagen und sind somit berechenbar. Oder doch nicht?

QUANTENFELDER

### 6 **Das Fundament der Physik**

Von Kevin Hartnett

FELDTHEORIEN

### 16 **Die Grundkräfte der Welt**

Von Manon Bischoff

GRUNDBAUSTEINE

### 24 **Was ist ein Teilchen?**

Von Natalie Wolchover

## KONKURRIERENDE DEUTUNGEN

Mit verschiedenen Interpretationen ringt die Fachwelt um ein tieferes Verständnis davon, was eigentlich genau passiert, wenn sich Objekte durch Raum und Zeit bewegen, miteinander verschränken und überlagern.

DE-BROGLIE-BOHM-THEORIE

### 32 **Eine klassische Quantenwelt**

Von Ward Struyve

ZEITMESSUNG

### 42 **Stoppuhr für Teilchenwellen**

Von Anil Ananthaswamy

TUNNELEFFEKT

### 48 **Mit Überlichtgeschwindigkeit durch die Wand**

Von Natalie Wolchover

## SELTSAME AUSWIRKUNGEN

Auch nach einem Jahrhundert bietet die Quantenmechanik immer wieder Überraschungen. Verbindet man Objekte auf unkonventionelle Weise oder dringt zu größeren Skalen vor, stößt man auf besonders exotische Effekte.

QUANTENSYSTEME

### 54 **Zeitkristalle**

Von Frank Wilczek

WÄRMELEHRE

### 62 **Die Quanten-Dampfmaschine**

Von Nicole Yunger Halpern

SCHWERKRAFT

### 68 **Eine Waage für das Vakuum**

Von Manon Bischoff

## WEGWEISENDE ANWENDUNGEN

Bereits entscheidende technologische Neuerungen des 20. Jahrhunderts, vom Mikrochip bis zum Laser, brauchen tiefe Einsichten in die Quantenmechanik. Mit der zunehmend besseren Kontrolle einzelner Systeme bahnt sich eine weitere Revolution an.

QUBITS

### 80 **Gegen den Quantenfehlerteufel**

Von Zaira Nazario

KRYPTOGRAFIE

### 90 **Schutz vor Quantenhackern**

Von Manon Bischoff

FERNWIRKUNGEN

### 100 **Erste Schritte zum Quanteninternet**

Von Marc-Olivier Renou, Nicolas Brunner und Nicolas Gisin

FESTKÖRPER

### 110 **Magie im Flachland**

Von Charles Wood

MATERIALWISSENSCHAFT

### 122 **Tarnkappen für Licht und Schall**

Von Andrea Alù

## RUBRIKEN

3 EDITORIAL

89 IMPRESSUM

Titelbild: agsandrew / Getty Images / iStock;  
Bearbeitung: Spektrum der Wissenschaft

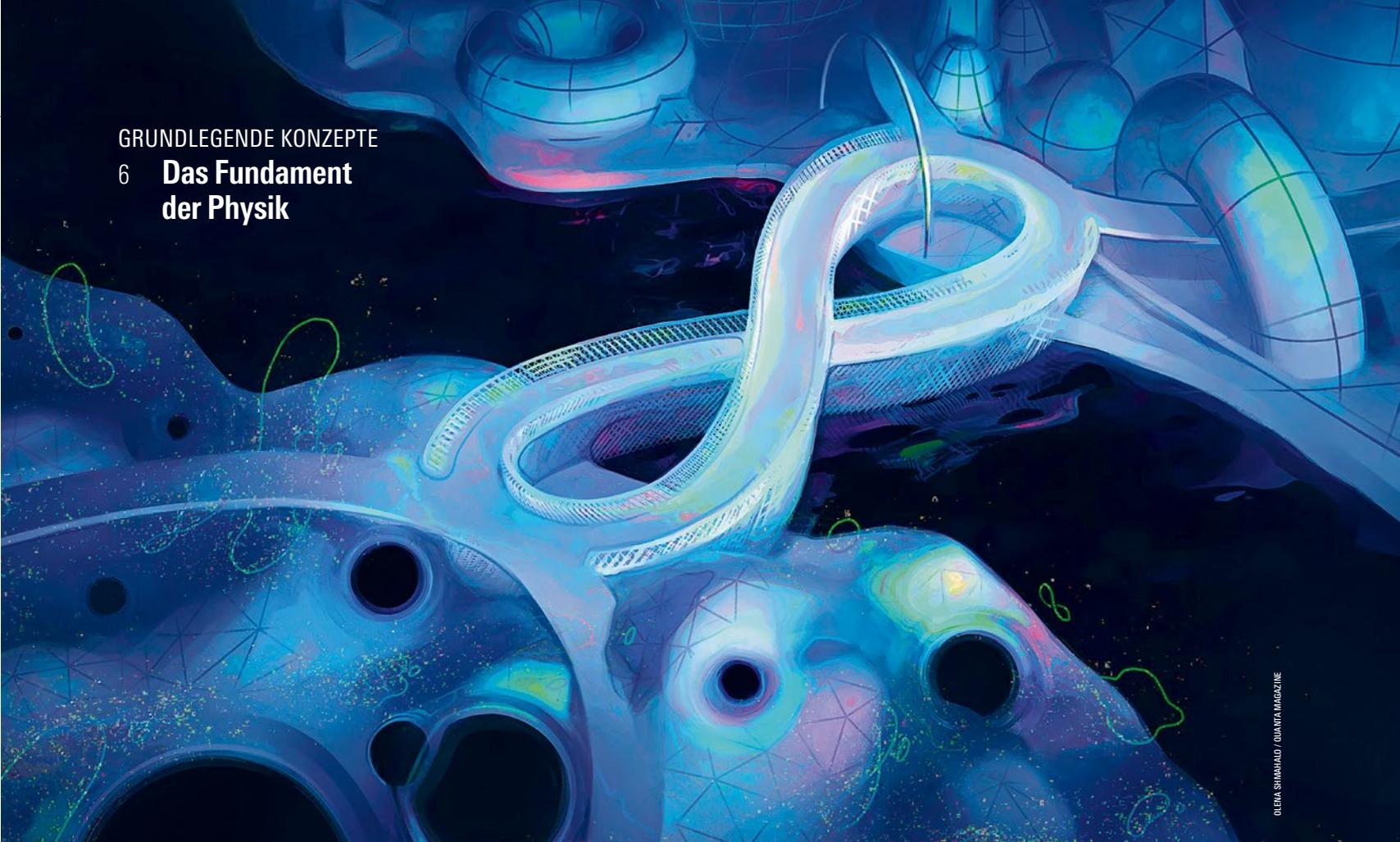


Alle Artikel auch digital  
auf **Spektrum.de**

Auf Spektrum.de berichtet unsere Redaktion täglich aus der Wissenschaft: fundiert, aktuell, exklusiv.

GRUNDLEGENDE KONZEPTE

6 **Das Fundament  
der Physik**



OLEVA SHWAHID / QUANTA MAGAZINE

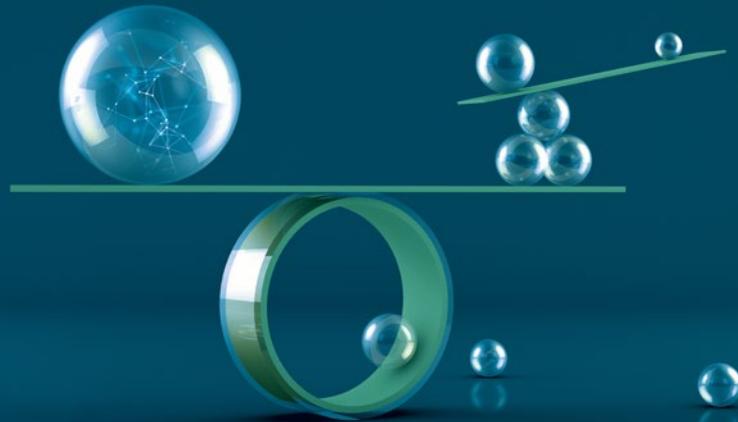
KONKURRIERENDE DEUTUNGEN

42 **Stoppuhr für  
Teilchenwellen**



KEVIN BROWN / MONDOGRAPHIC STUDIOS

AMIRBASTANI / GETTY IMAGES / ISTOCK IMAGES / ISTOCK / BEARBEITUNG SPECTRUM DER WISSENSCHAFT



SELTSAME AUSWIRKUNGEN

68 **Eine Waage  
für das Vakuum**

WEGWEISENDE ANWENDUNGEN  
110 **Magie im Flachland**



ISTOCK / GETTY IMAGES / ISTOCK