

ANTON ZEILINGER  
Einsteins Spuk

## *Buch*

Wie funktioniert Teleportation? Welche Experimente hat das Team um Anton Zeilinger durchgeführt, um Photonen zu verschränken? Was ist ein Quantum überhaupt? Und warum verhalten sich Teilchen wie Wellen?

Leicht verständlich und unterhaltsam stellt Anton Zeilinger Schritt für Schritt seine Experimente und die dahinter stehenden Gedanken aus der Quantenphysik dar. Alice und Bob, zwei Physikstudenten, die selbst gerade dabei sind, zu lernen, worum es in der Quantenphysik geht, begleiten den Leser auf seiner Entdeckungsreise in eine Welt voller faszinierender Rätsel und umwälzender Erkenntnisse.

## *Autor*

Anton Zeilinger, geb. 1945, gilt nicht erst seit seinem Bestseller »Einsteins Schleier« als Popstar unter den Naturwissenschaftlern. Nach Stationen am MIT, an den Universitäten Melbourne, Oxford und Innsbruck, den Technischen Universitäten Wien und München und am Collège de France ist er heute Professor an der Universität Wien und am Institut für Quantenoptik und Quanteninformation der Österreichischen Akademie der Wissenschaften. Seine Arbeit wurde mit zahlreichen Preisen und Auszeichnungen gewürdigt, darunter dem Orden »Pour le Mérite«, dem Forschungspreis der Alexander-von-Humboldt-Stiftung und dem King-Faisal-Preis 2005.

Im Goldmann Verlag ist von Anton Zeilinger  
außerdem erschienen:

Einsteins Schleier (15302)

Anton Zeilinger

---

Einsteins Spuk

Teleportation  
und weitere Mysterien  
der Quantenphysik

Aus dem Englischen  
von Friedrich Grieser

**GOLDMANN**

Die deutsche Fassung wurde vom Autor  
durchgesehen und ergänzt.



**Mix**  
Produktgruppe aus vorbildlich  
bewirtschafteten Wäldern und  
anderen kontrollierten Herkünften

Zert.-Nr. SGS-COC-1940  
www.fsc.org  
© 1996 Forest Stewardship Council

Verlagsgruppe Random House FSC-DEU-0100  
Das FSC-zertifizierte Papier *München Super* für Taschenbücher  
aus dem Goldmann Verlag liefert Mochenwangen Papier.

2. Auflage

Taschenbuchausgabe Februar 2007  
Wilhelm Goldmann Verlag, München,  
in der Verlagsgruppe Random House GmbH  
Copyright © der Originalausgabe 2005  
by C. Bertelsmann Verlag, München,  
in der Verlagsgruppe Random House GmbH  
Umschlaggestaltung: Design Team München  
unter Verwendung einer Illustration  
des Instituts für Experimentalphysik, Universität Wien

KF · Herstellung: Str.

Druck und Einband: GGP Media GmbH, Pößneck

Printed in Germany

ISBN: 978-3-442-15435-7

[www.goldmann-verlag.de](http://www.goldmann-verlag.de)

# Inhalt

Offenheit und Neugier – ein Vorwort .....	7
Danksagung .....	11
Prolog: Unter der blauen Donau .....	13
Glasfaseroptik und Informationsübertragung in der Telekommunikation .....	16
Eine kurze Geschichte des Reisens .....	25
Zu Wasser und zu Lande .....	25
Der Traum vom Fliegen und von der Raumfahrt .....	28
Der Science-Fiction-Traum Teleportation .....	35
Der Stoff, aus dem das Licht ist .....	37
Licht als Welle .....	38
Licht als Teilchen .....	43
Schäferhunde und Einsteins Lichtteilchen .....	45
Einstein und der Nobelpreis .....	55
Ein Konflikt .....	57
Alice, Bob und der Doppelspalt .....	58
Was ist Materie? .....	70
Quantenunschärfe: nur Sache unserer Unwissenheit – oder sind die Dinge wirklich so? .....	74
Die Quantenausrede .....	77
Laut Heisenbergs Unschärfebeziehung ist Teleportation unmöglich .....	87
Rettung kommt von der Quantenverschränkung .....	92
Verschränkte Quantenwürfel .....	94
Alice und Bob im Quantenlabor .....	106
Professor Quantinger über die Polarisation des Lichtes .....	118
Polarisation einzelner Lichtquanten .....	124

Alice und Bob entdecken Zwillingsteilchen . . . . .	135
Johns Vortrag über Einstein, Podolsky und Rosen . . . . .	148
Das EPR-Realitätskriterium . . . . .	156
Die EPR-Lokalitätsannahme . . . . .	169
Das Rätsel der Zwillinge . . . . .	171
Johns Geschichte von den lokalen verborgenen Variablen . .	177
Verwirrende Ergebnisse . . . . .	183
Die Geschichte von John Bell . . . . .	188
Verschränkung – ein Quantenrätsel für jedermann . . . . .	195
Alice, Bob und ihre unverständlichen Beobachtungen . . . . .	210
Schneller als das Licht und in die Vergangenheit? . . . . .	215
Die fantastische Quantenwelt . . . . .	221
In den Tiroler Bergen . . . . .	233
Erwin Schrödinger und Alpbach . . . . .	242
Die Quantenlotterie . . . . .	245
Quantenlotterie mit zwei Photonen . . . . .	253
Quantengeld – das Ende der Geldfälscher . . . . .	263
Quantenbits . . . . .	267
Ein Quantenbit kann mehr übertragen, als es tragen kann .	270
Die erste Quelle und die ersten Experimente . . . . .	275
Die Superquelle . . . . .	279
Die Teleportation an der Donau . . . . .	281
Der verschlungene Pfad zum Experiment . . . . .	293
Teleportation von Nichts . . . . .	300
Andere Experimente . . . . .	311
Die Zukunft der Quantenteleportation . . . . .	317
Reisen durch Teleportation? . . . . .	321
Signale vom Himmel über Teneriffa . . . . .	324
FAQs . . . . .	329
Ausblick . . . . .	333
Glossar . . . . .	341
Zum Weiterlesen und Weiterhören . . . . .	343
Personenregister . . . . .	345
Sachregister . . . . .	347
Bildnachweis . . . . .	352

## Offenheit und Neugier – ein Vorwort

Ohne Offenheit und Neugier geht es in der Wissenschaft nicht. Neugier, das brennende Verlangen, herauszufinden, was dahinter steckt, zu versuchen, die Welt zu verstehen. Und Offenheit für das Neue, auch wenn es dem zuwiderläuft, was man eigentlich erwartet hat. Offenheit und Neugier sind vielleicht die wichtigsten Eigenschaften, die ein Wissenschaftler mitbringen muss.

Offenheit und Neugier sind auch das Einzige, was Sie, liebe Leserin und lieber Leser, mitbringen sollten, wenn Sie dieses Buch aufschlagen und zu lesen beginnen. Es wurde ausdrücklich für Nichtwissenschaftler geschrieben. Ich hoffe daher, dass Sie, wenn Sie es beendet haben, einen Einblick in eine neue Welt gewonnen haben, die sich meist einem direkten Zugang durch unser Alltagsverständnis verschließt – die Welt der Quantenphysik.

Sie werden im Folgenden zwei Studenten treffen: Alice und Bob. Die beiden sind selbst dabei zu lernen, worum es in der Quantenphysik geht. Und Sie werden sehen, dass nicht nur Alice und Bob nicht alles verstehen, sondern offenbar sogar ihr Professor manchmal vor Rätseln steht. Sie können sich also beruhigt zurücklehnen, wenn auch Sie nicht alles nachvollziehen können. Darum geht es nicht.

Es geht darum, einen Blick hinter die Kulissen zu werfen und zu sehen, wie moderne Quantenphysik heute im Laboratorium stattfindet. Sie werden erfahren, wie einfach die Experimente im Grunde sind und wie schwierig es trotzdem ist, zu verstehen, was tatsächlich vor sich geht.

Die zweite Absicht des Buches aber ist es, Ihnen zu zeigen, wie viele Fragen noch offen sind. Noch wichtiger als die Änderungen durch neue Technologie werden wahrscheinlich die auf der Quantenphysik beruhenden Änderungen unserer Weltanschauung sein – Änderungen, von denen wir gegenwärtig nur eine grobe Ahnung haben. Diese Vermutung liegt deshalb nahe, weil die Quantenphysik bereits fast ein Jahrhundert alt ist und dennoch bis heute keine einheitliche, zufrieden stellende Interpretation gefunden wurde – wahrscheinlich deshalb, weil die Änderungen weit radikaler sein müssen, als vielen lieb ist.

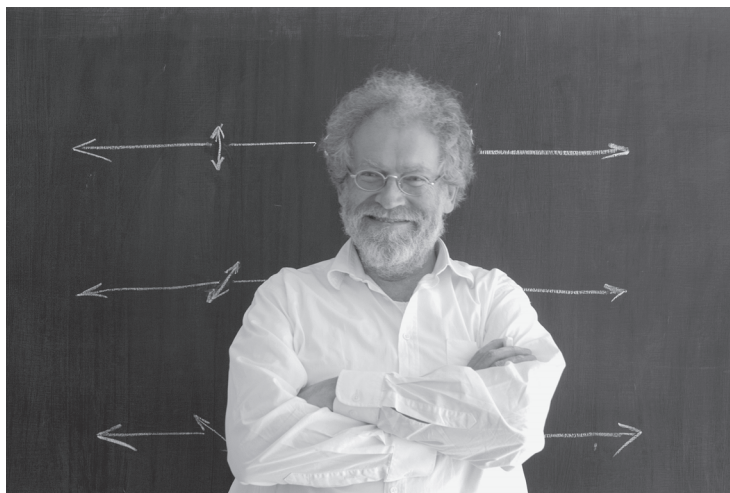
Zu den Technologien der Zukunft gehören Quantenteleportation und Quantencomputer, aber auch viele andere interessante Ideen. Sie werden ein Gefühl dafür bekommen, was hinter diesen Konzepten steht und welche enormen Entwicklungsmöglichkeiten hier vorhanden sind – insbesondere in der Datenübertragung sowie für superschnelle Rechner. Vieles von diesen Dingen beruht auf einem Phänomen, das Albert Einstein »spukhaft« nannte: Zwei Teilchen können auf viel engere Weise miteinander verbunden sein, als man dies nach dem gesunden Menschenverstand eigentlich erwarten würde. Beobachtung an einem der beiden Teilchen beeinflusst das andere, egal, wie weit es entfernt ist. Heute wissen wir durch viele Experimente, dass diese »Verschränkung« kein Spuk, sondern tatsächlich ein Teil unserer Welt ist. Sie werden in dem Buch genau kennen lernen, worum es sich handelt und wie sich dies zum Beispiel in der Quantenteleportation anwenden lässt.

*Einsteins Spuk* zeigt meine persönliche Sicht, die sicher nicht von allen Physikern geteilt wird. Ich habe auch nicht vor, die Leserinnen und Leser mit erhobenem Zeigefinger zu belehren. Vielmehr möchte ich, dass wir uns die Dinge gemeinsam ansehen, und dies geschieht eben am besten, indem man den Leuten bei ihrer Arbeit »über die Schulter schaut«. Ich lade Sie daher ein, sich geistig die Ärmel hochzukrempeln und sich auf das Abenteuer Quantenphysik einzulassen. Dass nicht alle Fragen beantwortet werden, möge auch Anregung sein, sich selbst neue Gedanken zu machen.

Einige Teile in *Einsteins Spuk* beschreiben unmittelbar persönliche Erfahrungen, beispielsweise der Besuch auf Teneriffa. Andere sind fiktiv, wie etwa die Dialoge zwischen Alice und Bob. Aber auch sie beruhen auf tatsächlich durchgeführten Experimenten. Es wird zudem bewusst offen gelassen, an welchem Ort die Geschichte von Alice und Bob spielt. Die Leserin, der Leser wird Hinweise auf mehrere Orte finden. Ebenso sind Alice und Bob nicht nur fiktive Studenten, sondern auch die handelnden Personen in Protokollen der Quantenkommunikation und Quantenteleportation. Ich hoffe, dass die Leser diesen Versuch, Quantenunbestimmtheit auch in den Aufbau des Buches einfließen zu lassen, mit Vergnügen zur Kenntnis nehmen werden.

Es ist meine vielleicht unbescheidene Hoffnung, mit *Einsteins Spuk* ein wenig dazu beizutragen, dass Sie, liebe Leserin und lieber Leser, das beginnende Quantenjahrhundert als genauso spannend und aufregend empfinden wie der Autor, der selbst sehr neugierig auf die neuen Entwicklungen ist.

Anton Zeilinger, Wien, im Oktober 2005





## Danksagung

*Einsteins Spuk* verdankt seine Entstehung dem Einsatz vieler Menschen, zuallererst den wissenschaftlichen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern in meiner Arbeitsgruppe, mit denen ich während der letzten dreißig Jahre zusammenarbeiten durfte. Viele in dem Buch berichtete Ergebnisse sind das Resultat meiner langjährigen Zusammenarbeit mit diesen Wissenschaftlern. Ich empfinde es als besondere Auszeichnung, einen Beruf zu haben, in dem ich einerseits junge Leute in neues Wissen einführen kann, das ich selbst faszinierend finde, und in dem andererseits diese jungen Leute immer wieder faszinierende Ideen und neue Sichtweisen hervorbringen. Gleichzeitig ist meine Gruppe in viele internationale Netzwerke mit anderen Wissenschaftlern weltweit eingebunden. Hier findet ein ständiger Austausch von neuen Ideen und wissenschaftlichen Resultaten statt.

Die Forschungsergebnisse wären nicht möglich gewesen ohne die ständige Unterstützung durch meine Frau Elisabeth, die mir immer den nötigen Freiraum für meine zeitintensive Beschäftigung mit der Wissenschaft gab.

Ganz besonderer Dank gilt Andrea Aglibut, nicht nur für die hervorragende Anfertigung des Manuskripts aus oft verwirrenden Diktaten, sondern auch für ihre Mithilfe bei der Zusammenstellung des Buches sowie für ihre vielfältige organisatorische Unterstützung. Für Recherchen und die genaue Überprüfung meiner Angaben danke ich Bibiane Blauensteiner und vielen anderen, die Material für dieses Buch beigetragen haben.

Ein wesentlicher Bestandteil des vorliegenden Werkes sind die Abbildungen. Die Cartoons sollen den Text nicht nur etwas auf-