

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.

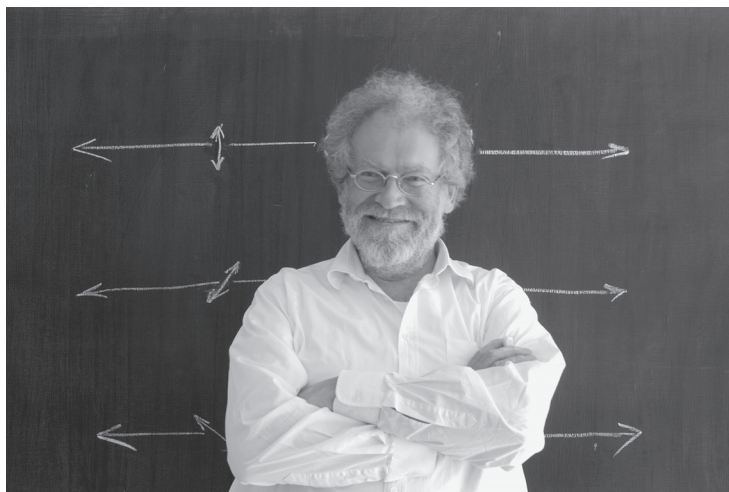
*Einsteins Spuk* zeigt meine persönliche Sicht, die sicher nicht von allen Physikern geteilt wird. Ich habe auch nicht vor, die Leserinnen und Leser mit erhobenem Zeigefinger zu belehren. Vielmehr möchte ich, dass wir uns die Dinge gemeinsam ansehen, und dies geschieht eben am besten, indem man den Leuten 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-

lockern, sondern dem Leser wesentliche Punkte intuitiv näher bringen. Hier habe ich mit Thomas Hamann eine sehr interessante Zusammenarbeit gefunden. Physikalische Sachverhalte, vor allem Details von Experimenten, stelle ich in Form von Zeichnungen an der Tafel dar, so wie ich dies in Vorlesungen für Studenten auch mache. Ich hoffe, dem Leser damit ein wenig das Gefühl eines direkten Gedankenaustauschs zu geben. Für die Anfertigung der Fotografien und ihre grafische Ausarbeitung sowie für ihre Hilfe bei Fotorecherchen danke ich Jacqueline Godany.

Ich hatte mich schon sehr lange mit dem Gedanken getragen, dieses Buch zu schreiben. Dafür, dass dieser Gedanke schließlich realisiert wurde, danke ich besonders John Brockman. Der Großteil der Texte wurde von mir auf Englisch verfasst und dann von Friedrich Griese innerhalb von sehr kurzer Zeit ins Deutsche übersetzt, wobei Sibylle Auer als Lektorin für Einheitlichkeit des Gedankenflusses sorgte. Ganz besonderer Dank gebührt aber Johannes Jacob vom Verlag C. Bertelsmann, der mich mit der richtigen Mischung von Geduld und Ungeduld motivierte.

*Last but not least* gebührt mein Dank allen Institutionen, die durch ihre Unterstützung die wissenschaftliche Arbeit meiner Gruppe über viele Jahre ermöglicht haben. Zu nennen sind hier insbesondere der Fonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung, die Europäische Kommission – und vor allem die österreichischen Steuerzahler.

Es ist unmöglich, hier den vielen Menschen besonders zu danken, von denen ich wichtige Anregungen erhalten habe. Erwähnen möchte ich jedoch meinen akademischen Lehrer Helmut Rauch, der von Anfang an mein Interesse an fundamentalen Fragen förderte und seine Begeisterung dafür an mich weitergab, sowie Michael Horne, der mir die Augen für das faszinierende Phänomen der Verschränkung öffnete, für »Einsteins Spuk«.

## Prolog: Unter der blauen Donau

Alljährlich am 1. Januar leitet das Neujahrskonzert der Wiener Philharmoniker das junge Jahr ein. Es wird aus dem Goldenen Saal des Wiener Musikvereins in alle Welt übertragen (Bild 1). Milliarden begeisterter Hörer lauschen den schönen Walzern, Polkas, Ouvertüren und anderen Stücken von Johann Strauß Vater und Sohn und deren Zeitgenossen. Wenn das Programm beendet ist, applaudieren die Zuhörer, doch alle warten noch auf die Zugabe. Dann setzen ganz leise die Streicher ein, und wieder klatschen alle, denn sie erkennen das erwartete Stück. Das Orchester schweigt, und der Dirigent wünscht den Anwesenden und den Zuhörern in aller Welt ein glückliches Neues Jahr. Wieder setzen die Streicher ein, und das Orchester spielt den berühmten Walzer »An der schönen blauen Donau« von Johann Strauß, der oft als inoffizielle Nationalhymne Österreichs bezeichnet wird. Es gibt nicht viele Musikstücke, die zugleich die Freude und die untrennbar mit dem menschlichen Dasein verbundene Melancholie so gut vermitteln können wie diese Musik, die für die großen Bälle des kaiserlichen Wien geschrieben wurde und noch heute alljährlich während der Ballsaison aufgeführt wird.

Die Anwesenden und die Zuschauer an den Fernsehern ahnen nicht, dass unweit des Goldenen Saals, innerhalb der Wiener Stadtgrenzen, mit modernster Technik ein Experiment durchgeführt wird, das die Vorstellungskraft herausfordert, einerseits mit Ideen, die man bisher nur aus der Science-Fiction kannte, andererseits mit seinen Folgen für das Verständnis der uns umgebenden Welt.

Das Konzert endet mit der letzten Zugabe, dem »Radetzky-marsch« von Johann Strauß, einem der schmissigsten und fröh-

lichsten Stücke, die je geschrieben wurden. Wir verlassen den Konzertsaal und fahren an die Donau. Es ist ein schöner Wintertag, und es sind nur wenige Menschen unterwegs, weil der 1. Januar ein Feiertag ist. Der Fluss fließt in zwei Armen durch Wien, die eine lang gestreckte Insel umschließen. Um vom Ufer auf die Insel zu gelangen, nehmen wir die Steinspornbrücke, die, weil sie für den öffentlichen Verkehr gesperrt ist, nicht einmal auf allen Karten verzeichnet ist.

Auf der Insel steuern wir ein graues Gebäude an, das hinter hohen Bäumen versteckt liegt. Hier befindet sich das Pumpwerk der Wiener Kanalisation. Unter dem Fluss verläuft ein großer Abwasserkanal, der beide Seiten miteinander verbindet. Er soll das gesamte Abwasser von der Ostseite der Donau, von den Wienern liebevoll »Transdanubien« (»Jenseits der Donau«) genannt, auf die andere Seite zu einer riesigen Abwasseraufbereitungsanlage pumpen, denn die sehr umweltbewussten Wiener möchten nicht, dass Abwasser direkt in den Fluss geleitet wird und dort die Umwelt gefährdet.

Wir betreten das Gebäude und begeben uns mit dem Fahrstuhl zwei Etagen nach unten. Nun befinden wir uns tiefer als die Wassermassen des Flusses. Nach einem kurzen Gang tut sich ein Tunnel auf, welcher die Flussufer in Transdanubien und im eigentlichen Wien miteinander verbindet. In diesem Tunnel verlaufen parallel Abwasserröhren und zahlreiche Kabel.

Versteckt in der Nähe des Eingangs zu einem der Tunnel erwartet uns eine andere Szene: In einer Ecke stoßen wir auf einen kleinen Raum mit Plexiglaswänden. Drinnen erkennen wir Laserlicht, eine Menge Hightech-Geräte einschließlich modernster Elektronik, Computer und dergleichen (Bild 2). Dort treffen wir Rupert Ursin. Er erzählt uns, er sei Student der Universität Wien und arbeite an seiner Doktorarbeit, die er in Kürze abzuschließen hoffe. Thema seiner Dissertation ist die »Quantenteleportation über lange Distanzen«. Wir bitten ihn, uns kurz zu erklären, was wir hier sehen. »Bei dem Experiment geht es darum, den Quantenzustand eines Lichtteilchens – eines Photons – von der Donauinsel hinüber nach Wien zu teleportieren«, sagt er.

Als er merkt, dass wir nicht viel verstehen, erläutert er, es sei so

etwas Ähnliches wie das »Beamen« in der Science-Fiction, »aber nicht ganz«, fügt er grinsend hinzu, um dann mit einer Erklärung zu beginnen. Wir verstehen noch immer kaum etwas, lauschen ihm aber mit wachsender Faszination. Er verspricht uns für später genauere Auskünfte. Einstweilen möchten wir uns nur ein wenig mit den von ihm benutzten Ausdrücken vertraut machen, uns an den Versuchsaufbau und die hier erforschten allgemeinen Konzepte gewöhnen und die seltsame Umgebung näher kennen lernen.

Die Laser, erfahren wir, dienen hauptsächlich dazu, ganz besondere Photonenpaare zu erzeugen, die miteinander »verschränkt« sind. Diese Verschränkung bedeutet, dass die zwei Photonen eng miteinander verknüpft sind. Wird das eine gemessen, so wirkt sich dies unverzüglich auf das andere aus, gleichgültig, wie weit die beiden voneinander entfernt sind.

Mit der Bezeichnung »Verschränkung« wollte der österreichische Physiker Erwin Schrödinger (Bild 3) im Jahre 1935 einen hochinteressanten Sachverhalt charakterisieren. Albert Einstein hatte kurz vorher in einer Arbeit gemeinsam mit Boris Podolsky und Nathan Rosen gezeigt, dass es nach der Quantenphysik einen hochinteressanten Sachverhalt geben müsste. Wir betrachten zwei Teilchen, die miteinander in Wechselwirkung getreten sind, zum Beispiel bei einem Zusammenstoß, und jetzt wieder auseinander fliegen. Dann kann es sein, dass die beiden noch immer auf sehr enge Weise miteinander zusammenhängen. Beobachtung eines der beiden Teilchen beeinflusst sofort, das heißt mit beliebig großer Geschwindigkeit, den Zustand des anderen. Albert Einstein mochte dies nicht und bezeichnete es als »spukhafte Fernwirkung«. Er hoffte, dass die Physiker einen Weg finden könnten, der diesen Spuk wieder aus der Welt schafft. Erwin Schrödinger dagegen akzeptierte diese Verschränkung als etwas ganz Wesentliches. Er meinte, dass sie uns zwingt, von allen unseren lieb gewordenen Vorstellungen, wie die Welt beschaffen ist, Abschied zu nehmen.

Auf unsere Frage nach dem Zweck der verschränkten Photonen im Experiment erwidert Rupert lächelnd: »Das ist der Zaubertrick.«

Er behält eines der beiden verschränkten Photonen in seinem Minilabor unter der Donau und schickt das andere durch eine

Glasfaser an den Empfänger jenseits des Flusses. Dabei spricht er von »Alice« und »Bob«, die einander Photonen schicken und miteinander reden, als seien sie Menschen. Es sind jedoch, wie sich herausstellt, imaginäre Experimentatoren: Alice, die hier in ihrem Labor sitzt, und Bob jenseits des Flusses.

Auf unsere Frage, warum die gerade Alice und Bob heißen, antwortet Rupert, dass ursprünglich Entschlüssler den Sender mit A bezeichnet haben und den Empfänger mit B, entsprechend den ersten Buchstaben des Alphabets. Wegen der einfacheren Sprechweise sind daraus irgendwann Alice und Bob geworden.

Rupert zeigt uns die dünne Glasfaser, durch die das Photon zu Bob geschickt wird – eine ganz gewöhnliche Glasfaser, ähnlich denen, die heute in der Telekommunikation üblich sind.

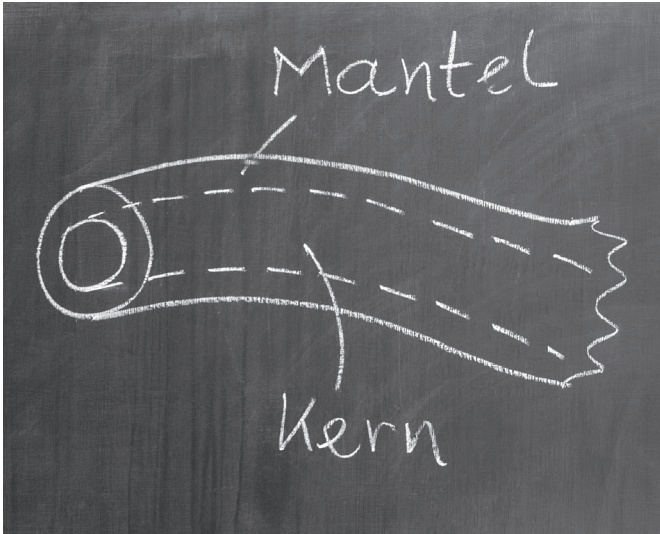
Durch diese Glasfaser kann man Licht von einem Ort zum anderen schicken. Wir folgen mit den Augen dem Kabel von Ruperts Laser. Es führt durch die durchsichtige Plexiglaswand seines kleinen Labors bis zu der Stelle, wo es sich zu all den anderen Kabeln gesellt, die durch die großen Tunnel unter der Donau verlaufen. Rupert folgt unserem Blick und fragt: »Möchtet ihr sehen, wo es hingehht?«

## **Glasfaseroptik und Informationsübertragung in der Telekommunikation**

Eine Glasfaser besteht offenbar aus zweierlei Glas, damit unterwegs kein Licht verloren geht: Eine dichtere Glassorte in der Mitte ist mit einem Mantel aus einer dünneren Sorte umkleidet (Abbildung 1). Dadurch kann Licht, das in den Kern eingetreten ist, nicht mehr heraus. Es wird von dem Mantel in den Kern zurückgespiegelt, sobald es entweichen möchte. Die Faser ist zudem von einer Reihe äußerer Hüllen aus Kunststoff oder ähnlichem Material umgeben und sieht am Ende aus wie ein ganz gewöhnliches Kabel. Mit solchen Glasfasern kann man Licht über viele Kilometer hinweg leiten.

Die Glasfaseroptik brachte einen der großen technischen Durchbrüche unserer Zeit. Zu den Neuerungen, die auf sie zurückgehen, gehört der



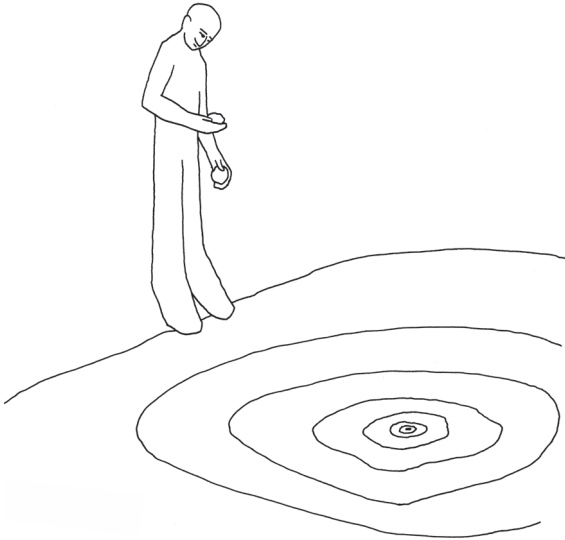


**Abbildung 1** Aufbau einer Glasfaser, wie sie zur Übertragung von Daten mit Hilfe von Licht verwendet wird. Die Faser besteht aus zwei verschiedenen Glassorten. Das Glas im Kern ist optisch dichter. Licht, das sich im Kern befindet, kann daher nicht in den Mantel treten, der aus optisch dünnerem Glas besteht. Solche Glasfasern können gebogen werden und daher Licht leicht um Ecken leiten.

schnelle Internetzugang, denn der extrem hohe Datenfluss zwischen modernen Computern ist nur durch Lichtwellen zu erreichen. Früher musste man, um Daten zu übertragen, verschiedene Orte auf der Erde mit Stromkabeln verbinden. Der Haken daran ist, dass über solche Kabel nur relativ geringe Datenmengen übertragen werden können. Wären die Computer noch immer durch normale Kupferkabel miteinander verbunden, würde das Herunterladen der heute üblichen großen Dateien eine Ewigkeit dauern.

Die Idee der Glasfasertechnik ist einfach: Statt elektrischem Strom nutzt man Licht als Träger der Information, die von einem Computer zum anderen geschickt wird. Dass Glasfasern sehr viel besser sind als Stromkabel, hat einen einfachen Grund. Er hängt mit einer wichtigen Eigenschaft des Lichtes zusammen, nämlich der Tatsache, dass es schwingt. Licht ist eine Schwingung elektrischer und magnetischer Felder, die sich durch Glas, Luft und sonstige Stoffe fortpflanzt. Es gibt elektromagnetische Felder, die sehr langsam schwingen, und andere, die sehr schnell schwingen. Die Frequenz der Schwingung besagt, wie oft das Feld innerhalb einer Sekunde hin- und herschwingt. Im Grunde verhält es sich mit der Schwingung des Lichtes nicht anders als mit der Schwingung einer Schaukel: Genau wie ein Kind auf einer Schaukel, so schwingt auch das elektromagnetische Feld hin und her.

Man kann auch ein anderes Bild heranziehen, etwa das von Wellen, die sich auf einem Teich oder einem See ausbreiten. Wenn man einen Stein hineinwirft, breiten sich von der Stelle, wo der Stein auftrifft, kleine Wellen aus (Abbildung 2). An diesen Wellen können wir zwei charakteristische Bewegungen beobachten, die grundsätzlich auf alle Wellen zutreffen. Erstens sehen wir, dass die Welle sich auf dem Wasser auf und ab bewegt. Die Häufigkeit, mit der ein bestimmter Punkt der Welle in einer Sekunde auf und ab schwingt, ist die Frequenz der Welle. Zum Beispiel schwingt eine Welle, deren Frequenz fünf Hertz beträgt, fünfmal in der Sekunde auf und ab. Zweitens sehen wir, dass die Welle sich von der Einschlagstelle des Steins nach außen fortpflanzt und in Form von Bergen und Tälern über den Teich eilt. Der Abstand zwischen zwei benachbarten Bergen ist die Wellenlänge. Bei dieser Wellenbewegung wird aber kein Wasser über den Teich transportiert. Man kann sie vielmehr so verstehen, dass Wassermoleküle durch ihre Bewegung ihre Nachbarn zum Mitma-



**Abbildung 2** Wellenausbreitung in einem Teich.

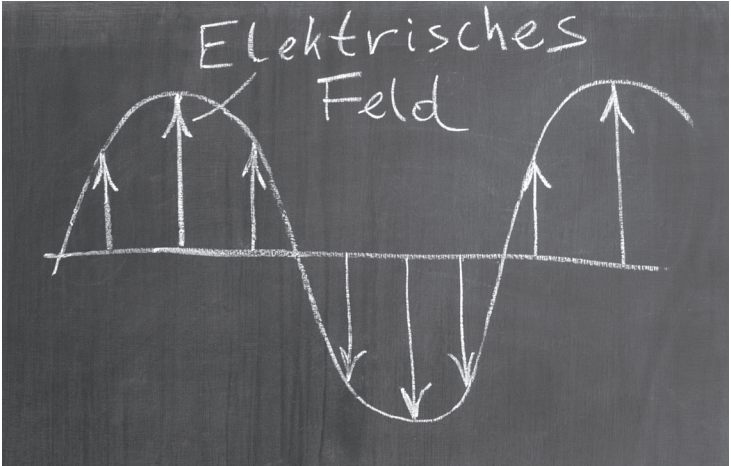
chen anregen. Die Wellenbewegung kann daher als eine gegenseitige Anregung von Teilen der Wasseroberfläche verstanden werden.

Ähnlich verhält es sich mit einer elektromagnetischen Welle, die sich beispielsweise von einer Funkantenne aus nach außen fortpflanzt. Es gibt eine Folge von elektrischen und magnetischen Feldern, die sich von der Antenne her nach außen ausbreiten, genau wie die Wellen auf dem Teich (Abbildung 3).

Obwohl die Wasserwelle kein Wasser über den Teich transportiert – und die elektromagnetische Welle auch keinen Strom –, kann man diese Wellen dazu nutzen, um Nachrichten zu verschicken oder allgemein Information zu übertragen. Dies geschieht dadurch, dass man die Welle auf irgendeine Weise verändert. Dabei wird die Information den ausgehenden Wellen durch eine Änderung der Schwingung aufgeprägt. Generell kann die Schwingung auf zweierlei Weise geändert werden: Entweder ändert man die Frequenz – *wie oft* die Welle auf der Teichoberfläche auf und ab geht – oder die Amplitude der Schwingung – *wie weit* die Oberfläche sich in einer Schwingungsperiode auf und ab bewegt.

Man kann diese Konzepte leicht spielerisch nachprüfen, indem man die Hand in einer gefüllten Badewanne ganz leicht und langsam auf und ab bewegt. Es entstehen kleine Wellen, die sich ausbreiten. Nun kann man die Hand häufiger schwingen lassen, also die Frequenz erhöhen, ohne etwas daran zu ändern, wie weit sie sich auf und ab bewegt. Dabei bleibt die Höhe der Wellen ungefähr gleich, aber sie schwingen schneller. Ein Empfänger der Wellen kann auf diese Weise eine Nachricht erhalten, wenn wir uns zuvor mit ihm darüber verständigt haben, was die Frequenzänderung bedeutet; er kann sie dann korrekt deuten. Eine höhere Frequenz könnte beispielsweise eine Warnung vor einer Gefahr bedeuten.

Umgekehrt kann man die Höhe, über die sich die Hand auf und ab bewegt, vergrößern, dabei aber die Frequenz unverändert lassen. Nun werden die Wellen tiefer – auch dies eine Veränderung, die ein ferner Beobachter erkennen kann. Tatsächlich werden beide Verfahren, Information in einer Welle zu verschlüsseln, bei elektromagnetischen Wellen benutzt. Das erste wird als Frequenzmodulation bezeichnet und bei der UKW- und Fernsehübertragung benutzt, das zweite als Amplitudenmodulation; es kommt bei der Funkübertragung im Frequenzbereich der Lang-, Mittel- und Kurzwellen zum Einsatz.



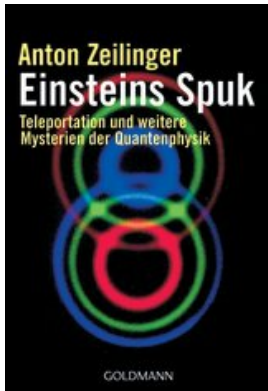
**Abbildung 3** Licht ist eine elektromagnetische Welle, die sich im freien Raum ausbreitet. Im Bild sieht man eine Momentaufnahme des elektrischen Feldes. Die Länge jedes Pfeils gibt an, wie groß die Stärke des elektrischen Feldes an der jeweiligen Stelle ist. An einer gegebenen Stelle schwingt das elektromagnetische Feld auf und ab. Gleichzeitig breitet sich eine Welle, ähnlich der Wasserwelle im Raum, aus, etwa im Bild von links nach rechts. Mit dem elektrischen Feld verbunden ist ein magnetisches Feld, das im Bild nicht gezeichnet ist. Es steht rechtwinkelig auf das elektrische.

Ein wichtiger Punkt ist, dass die Informationsmenge, die eine Welle befördern kann, von ihrer Frequenz abhängt. Und zwar kann eine Welle umso mehr Information übertragen, je höher ihre Frequenz ist. Genau deshalb ist Licht ein so geeigneter Informationsträger. Die typische Schwingungsfrequenz von Licht beträgt fast  $10^{15}$  Hertz. Das sind eine Million Milliarden Schwingungen pro Sekunde. Demgegenüber kann ein Stromdraht in der Regel nur Frequenzen übertragen, die etwa eine Milliarde Schwingungen pro Sekunde nicht übersteigen, und das über nicht zu lange Strecken. Das ist immer noch viel, aber doch eine Million Mal weniger als die Frequenz des Lichtes! Moderne Computer sind daher heute durch Glasfaserkabel verbunden, und nur auf den letzten paar Kilometern bis zum privaten Anwender werden noch Telefondrähte aus Kupfer verwendet.

Rupert benutzt bei seinem Experiment ein Glasfaserkabel, um eines seiner verschränkten Photonen von dem Labor auf der Donauinsel unter dem Fluss hindurch in die Stadt zu transportieren. Mit unseren Blicken folgen wir der Faser in den Tunnel. Da fragt Rupert: »Möchtet ihr sehen, wo es hingeht?« Das möchten wir sehr gern, und damit beginnt unser kleiner Ausflug in den Untergrund von Wien.

Wir betreten zunächst eine Röhre mit einem Durchmesser von etwa vier Metern, die steil abwärts führt. Unter uns verlaufen zwei Rohrleitungen von rund einem Meter Durchmesser, die, wie uns Rupert erklärt, das Abwasser befördern. Auf unser Wohlbehagen wirkt sich das nicht sonderlich aus, weil sie dicht versiegelt sind, auch wenn es ein bisschen seltsam riecht. Man kann bequem aufrecht gehen, aber viel Platz ist nicht. Rechts und links verlaufen Kabeltrassen. In einem dieser Kabel befindet sich unsere kleine optische Faser.

Einer von uns bemerkt: »Genau wie im ›Dritten Mann‹« und erinnert damit an einen der größten Filme aller Zeiten, der im Wien der Nachkriegszeit spielt; zu den großartigsten Szenen gehören wilde Verfolgungsjagden in der Kanalisation der Stadt. Jeden Augenblick rechnen wir damit, dass Orson Welles um die Ecke kommt, und wir haben das von Anton Karas auf der Zither gespielte Harry-Lime-Thema im Ohr.



Anton Zeilinger

## **Einsteins Spuk**

Teleportation und weitere Mysterien der Quantenphysik

Taschenbuch, Broschur, 352 Seiten, 12,5 x 18,3 cm

ISBN: 978-3-442-15435-7

Goldmann

Erscheinungstermin: Januar 2007

Schon Einstein rätselte über das Phänomen der „spukhaften Fernwirkung“. Der Wiener Experimentalphysiker Anton Zeilinger bietet – unterhaltsam und für den Laien verständlich geschrieben – nicht nur fundierten Einblick in einen der spannendsten Bereiche der Physik, sondern zugleich eine umfassende Einführung in die Quantenphysik.