

Nicolas Gisin

Der unbegreifliche Zufall

Nichtlokalität,
Teleportation
und weitere
Seltsamkeiten der
Quantenphysik



SACHBUCH



Springer Spektrum

Der unbegreifliche Zufall



Nicolas Gisin ist Direktor des Instituts für Angewandte Physik an der Universität Genf und Mitbegründer der Gesellschaft ID Quantique. Er ist international bekannt für seine Arbeit in der Kryptographie und der Quanten-Informationstheorie sowie Herausgeber der Reihe „Quantum Science and Technology“.

2009 erhielt er den ersten John S. Bell Preis für die Demonstration langreichweitiger Verschränkungen und Quantenteleportationen sowie für seine zahlreichen Beiträge zu den Bell'schen Ungleichungen.

Nicolas Gisin

Der unbegreifliche Zufall

Nichtlokalität, Teleportation und
weitere Seltsamkeiten der
Quantenphysik

Aus dem Französischen
von Manfred Stern



Springer Spektrum

Nicolas Gisin
Universität Genf
Genf, Schweiz

ISBN 978-3-662-43957-9

ISBN 978-3-662-43958-6 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-662-43958-6

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Spektrum

Übersetzung der französischen Originalausgabe „L'Impensable Hasard. Non-localité, téléportation et autres merveilles quantiques“ von Nicolas Gisin, erschienen bei Odile Jacob (www.odilejacob.fr) 2012, © Odile Jacob 2012, alle Rechte vorbehalten.

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2014

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Planung und Lektorat: Vera Spillner, Bettina Saglio

Redaktion: Prof. Dr. Karin Richter, Laura Keller

Einbandentwurf: deblik, Berlin

Übersetzung: Aus dem Französischen von Manfred Stern

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Springer Spektrum ist eine Marke von Springer DE. Springer DE ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media

www.springer-spektrum.de

Geleitwort

Liebe auf den ersten Blick!

Als ich hörte, wie Nicolas Gisin seine Emotionen beschrieb, als er Bekanntschaft mit dem Bell'schen Theorem machte, durchlebte ich sofort wieder jenen Tag im Herbst 1974, an dem ich mich in eine Kopie des damals wenig bekannten Artikels von John Bell vertieft hatte, und begriff, dass eine experimentelle Antwort auf die fundamentale Debatte möglich war, die Bohr und Einstein bei der Interpretation des quantenmechanischen Formalismus zu Widersprüchen gemacht hatte. Zwar kannte eine Reihe von Physikern das Problem von Einstein, Podolsky und Rosen (Stichwort: „EPR-Paradoxon“ oder „EPR-Effekt“), aber kaum jemand hatte von den Bell'schen Ungleichungen gehört und nicht viel zahlreicher waren diejenigen, die Fragen zu den konzeptuellen Grundlagen der Quantenmechanik überhaupt für untersuchenswert hielten. Der EPR-Artikel, der 1935 im *Physical Review* erschien, war in den großen Bibliotheken leicht zugänglich – im Gegensatz zu John Bells Arbeit, die in einer unbekannten neuen Zeitschrift erschien, die nach nur vier Ausgaben wieder von der Bildfläche verschwand. Damals gab es weder Internet noch Online-Bibliotheken und man verbreitete Artikel, die nicht in den großen Zeitschrif-

ten veröffentlicht wurden, mit Hilfe von Fotokopien. Ich hatte meine Kopie aus einem Ordner, den Christian Imbert, ein junger Professor des Instituts für Optik, anlässlich eines Besuches von Abner Shimony angelegt hatte, der von Bernard d'Espagnat nach Orsay eingeladen worden war. Dem Reiz des Bell'schen Artikels verfallen, beschloss ich, meine Dissertation über die experimentellen Tests der Bell-Ungleichungen zu schreiben und Christian Imbert nahm mich in sein Labor auf.

Dem beeindruckend klaren Artikel von Bell habe ich entnommen, was die äußerste Herausforderung für einen Experimentator ist: Während der Ausbreitung der verschränkten Teilchen von der Quelle zu den Messbereichen die Ausrichtung der Messgeräte zu verändern, um durch das Prinzip der relativistischen Kausalität – die den physikalischen Effekten eine Ausbreitung mit Überlichtgeschwindigkeit verbietet – jede Möglichkeit eines Einflusses auszuschließen, den die Ausrichtung der Geräte auf den Emissionsmechanismus oder auf die entfernte Messung haben könnten. Mit einem solchen Experiment hätte man die Quintessenz des Konflikts eingefangen, der zwischen der Quantenmechanik und dem *lokalen Realismus*, das heißt, dem von Einstein verfochtenen Weltbild, besteht. Von dieser Warte aus kann man von der *physikalischen Realität* eines Systems sprechen, das sich in einem endlichen Bereich der Raumzeit befindet, und diese physikalische Realität (*Lokalität*) lässt sich nicht durch das beeinflussen, was mit einem zweiten System passiert, welches vom erstgenannten durch ein „raumartiges“ Intervall der Raumzeit getrennt ist – in dieser Situation können beide Systeme nur dann miteinander kommunizieren, wenn man die Exis-

tenz von Einflüssen annimmt, die sich schneller als das Licht ausbreiten. Falls das Experiment die Voraussagen der Quantenmechanik bestätigt, dann müsste man auf den lokalen Realismus verzichten, also auf das Weltbild, das Einstein auf überzeugende Weise verteidigte. Demnach wäre die Frage verlockend, ob man auf den Realismus oder auf die Lokalität verzichten müsste.

Die Infragestellung des Konzepts der physikalischen Realität an sich überzeugt mich nicht, denn mir scheint, dass die Rolle des Physikers darin besteht, die Realität der Welt zu beschreiben, und nicht nur in der Fähigkeit zum Ausdruck kommt, die von Messgeräten festgestellten Ergebnisse vorherzusagen. Falls sich aber nun die Quantenmechanik bestätigt – was wir heute akzeptieren müssen –, muss man dann nicht die Existenz von nichtlokalen Wechselwirkungen anerkennen, was scheinbar das Einstein'sche Prinzip der relativistischen Kausalität verletzt? Und kann man davon träumen, diese Nichtlokalität der Quantenmechanik zu nutzen, um ein verwertbares Signal (zum Einschalten einer Lampe oder der Erteilung einer Börsenorder) mit Überlichtgeschwindigkeit zu übermitteln? An dieser Stelle kommt ein weiteres spezifisches Merkmal der Quantenmechanik ins Spiel: Die Existenz eines *fundamentalen Quantenindeterminismus* – die absolute Unmöglichkeit, das Ergebnis aus einem speziellen Experiment abzuleiten, wenn die Quantenmechanik vorhersagt, dass mehrere Ergebnisse möglich sind. Freilich gestattet es die Quantenmechanik, die Wahrscheinlichkeiten dieser verschiedenen Ergebnisse präzise zu berechnen, aber sie sind nur statistisch signifikant, weil das Experiment viele Male wiederholt wird – über das Ergebnis eines einzelnen Expe-

riments kann damit keine Aussage gemacht werden. Hier kommt der *fundamentale Quantenzufall* ins Spiel, der die Möglichkeit einer Kommunikation mit Überlichtgeschwindigkeit verbietet.

Unter den zahlreichen Büchern, die einem breiten Publikum die aktuellen Fortschritte der Quantenphysik erläutern wollen, zeichnet sich das Buch von Nicolas Gisin dadurch aus, dass es die bedeutende Rolle dieses fundamentalen Quantenzufalls hervorhebt, ohne den ein mit Überlichtgeschwindigkeit funktionierender Telegraph vorstellbar wäre. Sollte ein solches Gerät Wirklichkeit werden, dann würde dieser Science-Fiction-Mythos eine radikale Revision der heutigen Physik erfordern. Nichts liegt mir ferner als zu behaupten, dass es physikalische Gesetze gäbe, die für immer unantastbar sind – ganz im Gegenteil, ich bin zutiefst davon überzeugt, dass jede physikalische Theorie früher oder später durch eine Theorie verdrängt wird, die ein größeres Gebiet umfasst. Aber einige der Theorien sind so fundamental, dass ihre Infragestellung eine konzeptuelle Revolution von beispiellosem Ausmaß erfordern würde. In der Menschheitsgeschichte gab es einige solche Beispiele, aber sie sind derart außergewöhnlich, dass man ihren Ausnahmecharakter hervorheben muss. In diesem Zusammenhang scheint es mir ein besonders wichtiger Aspekt des Buches von Nicolas Gisin zu sein, dass der Autor erklärt, warum es die Quantennichtlokalität trotz ihrer Außergewöhnlichkeit nicht gestattet, die relativistische Kausalität zu kippen, die eine Kommunikation mit Überlichtgeschwindigkeit verbietet.

Es ist kaum überraschend, dass sich dieses Buch von anderen populärwissenschaftlichen Werken abhebt, denn Ni-

colas Gisin war einer der Hauptakteure der neuen Quantenrevolution, die im letzten Viertel des zwanzigsten Jahrhunderts stattfand. Die erste Quantenrevolution, welche die Physik zu Beginn des 20. Jahrhunderts grundlegend verändert hat, beruhte auf dem Welle-Teilchen-Dualismus. Diese Revolution hat es ermöglicht, das statistische Verhalten der Milliarden und Abermilliarden von Atomen, aus denen sich die Materie zusammensetzt, sowie der Elektronenwolken, die den elektrischen Strom in Metall oder in einem Halbleiter leiten, ebenso beeindruckend genau zu beschreiben wie das statistische Verhalten von Photonen, die einen Lichtstrahl bilden. Die Quantenmechanik hat die notwendigen Instrumente zum Verständnis der mechanischen Eigenschaften der Festkörper bereitgestellt, wohingegen die klassische Physik nicht erklären konnte, warum die Materie, die aus sich anziehenden positiven und negativen Ladungen besteht, nicht in sich selbst zusammenfällt. Außerdem hat die Quantenmechanik eine präzise quantitative Beschreibung der elektrischen und optischen Eigenschaften der Materialien gegeben sowie den konzeptuellen Rahmen für die Beschreibung von so überraschenden Phänomenen bereitgestellt wie die Supraleitfähigkeit oder die seltsamen Eigenschaften gewisser Elementarteilchen. Es war außerdem im Zusammenhang mit dieser ersten Quantenrevolution, dass Physiker neue Erfindungen gemacht haben (Transistoren, Laser und integrierte Schaltkreise), die zur Informationsgesellschaft geführt haben. In den 1960er Jahren aber haben Physiker angefangen, sich zwei neue Fragen zu stellen, die von der ersten Quantenrevolution unbeachtet geblieben sind:

- (1) Wie wendet man die Quantenphysik, deren Vorhersagen von statistischer Natur sind, auf einzelne mikroskopische Objekte an?
- (2) Entsprechen die überraschenden Eigenschaften von verschränkten Paaren von Quantenobjekten, die im EPR-Artikel von 1935 beschrieben wurden, aber niemals beobachtet worden sind, tatsächlich dem Verhalten der Natur, oder wäre es möglich, dass man an eine der Grenzen der Quantenmechanik gestoßen ist?

Diese Fragen sind zuerst von den Experimentatoren beantwortet und dann von den Theoretikern vertieft worden. Das hat die neue Quantenrevolution eingeleitet, deren Zeugen wir jetzt sind¹.

Die Physiker haben die Frage nach dem Verhalten einzelner Quantenobjekte stets lebhaft und mitunter äußerst kontrovers diskutiert. Lange Zeit dachte die Mehrheit der Physiker – darunter durchaus nicht die unbedeutendsten –, dass diese Frage keinen Sinn mache und allenfalls unwichtig sei, da es nicht denkbar war, ein einzelnes Quantenobjekt zu beobachten, geschweige denn, es zu kontrollieren oder zu manipulieren. Dazu hat zum Beispiel Erwin Schrödinger Folgendes gesagt: „[...] es ist nun einmal so, dass wir genauso wenig mit einzelnen Teilchen experimentieren, wie wir Ichthyosaurier in einem Zoo züchten können².“ Aber ab Beginn der 1970er Jahre waren die Experimentatoren dazu in der Lage, einzelne mikroskopische Objekte (Elektronen, Atome, Ionen) zu beobachten, zu manipulieren und zu kontrollieren. Ich erinnere mich immer noch lebhaft an die Begeisterung der Teilnehmer der Internationalen Konferenz über Atomphysik, die 1980 in Boston stattfand: Peter

Toschek präsentierte das erste Foto eines einzelnen eingefangenen Ions, das direkt beobachtet werden konnte dank der Fluoreszenzphotonen, die es re-emittierte, als es mit einem Laser angestrahlt wurde. Diese experimentellen Fortschritte haben es ermöglicht, die berühmten Quantensprünge direkt zu beobachten und damit jahrzehntelange Kontroversen zu beenden. Diese Fortschritte haben auch gezeigt, dass der Quantenformalismus in der Lage ist, das individuelle Verhalten der betreffenden Teilchen zu beschreiben – vorausgesetzt, dass die probabilistischen Ergebnisse der Berechnungen richtig interpretiert werden. Was die zweite Frage betrifft, die sich auf die Eigenschaften der Verschränkung bezieht, hat man zuerst mit Hilfe von Photonenpaaren gezeigt, dass sich die Quantenberechnungen testen lassen. Das geschah in einer Reihe von Experimenten, die sich immer mehr dem idealen Schema annäherten, von dem die Theoretiker – angefangen mit John Bell – geträumt hatten. Diese Experimente bestätigten die Gültigkeit der Vorhersagen der Quantenphysik, so überraschend sie auch gewesen sein mögen.

Nicolas Gisin hatte schon immer ein persönliches Interesse an den Grundlagen der Quantenmechanik und war entsprechend im Rahmen der theoretischen Erforschung dieser Grundlagen aktiv. Zudem gründete er in den 1980er Jahren eine Arbeitsgruppe für angewandte Physik, die mit Glasfasern arbeitete (das erfolgte mehr oder weniger heimlich oder zumindest seinem Arbeitgeber gegenüber diskret, da Fragen dieser Art damals nicht immer wohlwollend betrachtet wurden). Aufgrund dieser Vorgeschichte gehörte Nicolas Gisin ganz selbstverständlich zu den ersten, die die Quantenverschränkung an in Glasfasern

injizierten Photonenpaaren getestet haben. Seine Kenntnisse der kommerziellen Glasfasertechnologien haben es ihm – wohl zur allgemeinen Überraschung – ermöglicht, unter Verwendung des rund um Genf installierten kommerziellen Telecom-Glasfasernetzes zu beweisen, dass die Verschränkung Entfernungen von mehreren Dutzend Kilometern übersteht. Verschiedene konzeptuell einfache Tests haben es ihm gestattet, den absolut verblüffenden Charakter der Verschränkung von weit voneinander entfernten Ereignissen herauszuarbeiten und das berühmte Quantenteleportationsprotokoll zu erstellen. Aufgrund von Gisin's doppelter Kompetenz als Grundlagentheoretiker und als Experte für Anwendungen von Glasfasern ist es auch nicht überraschend, dass er zu den ersten Entwicklern von Anwendungen der Verschränkung gehört – Anwendungen wie zum Beispiel die Quantenkryptographie oder die Erzeugung von echten Zufallszahlen.

Die beiden oben genannten Talente von Nicolas Gisin finden wir in diesem spannenden Buch wieder, in dem es dem Verfasser gelungen ist, besonders subtile Fragen der Quantenphysik populärwissenschaftlich und ohne Rückgriff auf den mathematischen Formalismus darzustellen. Der Autor verrät uns, was sich hinter den Konzepten der Verschränkung, der Quantennichtlokalität und des Quantenzufalls verbirgt, und stellt uns einige Anwendungen davon vor. Aber dieses Buch ist mehr als nur ein populärwissenschaftliches Werk: Auch Spezialisten der Quantenphysik finden hier tiefgründige Diskussionen über diese Phänomene, deren Tragweite wir – wie Nicolas Gisin schreibt – bei weitem noch nicht vollständig verstanden haben, geschweige denn ihre Konsequenzen. Auf die Frage, ob uns

die experimentelle Ablehnung des lokalen Realismus dazu führen muss, das Konzept der physikalischen Realität oder das der Lokalität³ aufzugeben, antworte ich wie der Autor des vorliegenden Buches: So kohärent und intellektuell zufriedenstellend das umfassende Konzept des lokalen Realismus auch war, so viel weniger befriedigend ist es, dieses in Stücke zu zerlegen und nur eines der beiden Teilkonzepte (physikalische Realität oder Lokalität) beizubehalten. Wie soll man die autonome physikalische Realität eines in der Raumzeit lokalisierten Systems definieren, wenn dieses System von dem beeinflusst wird, was in einem anderen System geschieht, das vom ersten durch ein raumartiges Intervall getrennt ist? Das vorliegende Buch bietet uns eine weniger einschneidende Lösung an. Der Autor weist nämlich Folgendes nach: Zieht man die Existenz eines fundamentalen Quantenzufalls in Betracht, dann lässt sich die Koexistenz zwischen einer nichtlokalen physikalischen Realität und der relativistischen Kausalität, die Einstein so wichtig war, friedlicher gestalten. Sogar Physiker, die mit diesen Fragen vertraut sind, werden im Buch von Nicolas Gisin Material finden, das ihre Überlegungen voranbringt. Und das wissbegierige Lesepublikum, das hier die Geheimnisse der Verschränkung und der Nichtlokalität entdeckt, kann unmittelbar zur zentralen Fragestellung vordringen und alle einschlägigen Feinheiten lernen, die von einem der auf diesem Gebiet weltweit führenden Spezialisten auf einleuchtende Weise erläutert werden⁴.

Alain Aspect, Palaiseau, Mai 2012

Vorwort

Hätten Sie zur Zeit der Newton'schen Revolution gelebt, hätten Sie dann verstehen wollen, was vor sich ging? Heute gibt uns die Quantenphysik die Gelegenheit, eine konzeptuelle Revolution ähnlichen Ausmaßes direkt zu erleben. Dieses Buch wird Ihnen dabei helfen, zu verstehen, was vor sich geht. Und zwar ohne Mathematik, aber auch ohne zu versuchen, die konzeptuellen Schwierigkeiten unter den Tisch zu kehren. Zwar braucht die Physik die Mathematik, um die Folgen der aufgestellten Hypothesen zu erforschen und gewisse physikalische Vorhersagen exakt zu berechnen. Aber die große Geschichte der Physik kann auch ohne Mathematik erzählt werden. Denn das Interessante an der Physik sind nicht die mathematischen Aspekte, sondern die Konzepte. Er geht hier nicht darum, die Gleichungen richtig zu lösen, sondern die Konzepte dahinter zu *verstehen*.

Manche Passagen dieses Buches verlangen dem Leser einiges an Gehirnakrobatik ab. Jeder wird etwas verstehen und niemand wird alles verstehen! Auf diesem Gebiet wird selbst der Begriff des Verstehens unscharf. Ich wette jedoch, dass alle einen Teil der gegenwärtig stattfindenden konzeptuellen Revolution verstehen und auch ihre Freude daran haben können. Dafür muss man akzeptieren, dass nicht alles gleich „glasfaserklar“ ist, und sich gleichzeitig

nicht vom Vorurteil irreführen lassen, Physik sei einfach unverständlich ...

Falls Ihnen eine Stelle zu schwierig erscheint, dann lesen Sie einfach weiter, in der Folge wird Ihnen die Sache wahrscheinlich klar werden. Mitunter werden Sie auch merken, dass es sich um eine Feinheit handelt, die ich mit Blick auf meine Physikerkollegen habe einfließen lassen, denn die Lektüre dieses Buches soll auch ihnen Vergnügen bereiten. Und falls notwendig, dann blättern Sie einfach zurück, um eine schwierige Stelle noch einmal zu lesen. Vergessen Sie dabei bitte nicht: Wichtig ist nicht, alles zu verstehen, sondern einen Gesamtüberblick zu bekommen. Sie werden sehen, dass man schließlich nicht nur ein Quäntchen, sondern wirklich eine Menge Quantenphysik verstehen kann, ohne die Mathematik einzuspannen!

Die Quantenphysik ist oft Gegenstand weitschweifiger Interpretationen und approximativer philosophischer Abhandlungen. Um diese Klippen zu umschiffen, stützen wir uns hier lediglich auf den gesunden Menschenverstand. Wenn Physiker ein Experiment durchführen, dann hinterfragen sie eine externe Realität. Die Physiker entscheiden, welche Fragen sie stellen und wann. Geht zum Beispiel ein rotes Licht an, dann fragen sich Physiker nicht, ob das Licht wirklich rot ist oder ob es sich um eine Illusion handelt: Die Antwort ist „rot“ und Punkt.

Die Leser werden bemerken, dass gewisse Anekdoten in verschiedenen Kapiteln des Buches wiederholt auftauchen. Meine Erfahrungen in der Lehre haben mir gezeigt, dass es für das Verständnis oft sehr hilfreich ist, manche wichtigen Punkte in unterschiedlichen Zusammenhängen zu wiederholen. Und schließlich sei gesagt, dass das vorliegende Buch

keinen historischen Anspruch erhebt. Die Anmerkungen zu meinen berühmten Vorgängern spiegeln lediglich meine eigenen Überlegungen wider, die sich in den mehr als dreißig Jahren meines Lebens als Berufsphysiker akkumuliert haben.

Nicolas Gisin, Genf, März 2014

Danksagungen

Ich denke in Dankbarkeit an alle meine Studenten und anderen Mitarbeiter, die mich angespornt haben. Ebenso danke ich allen, die die ersten Versionen gelesen und kritische Bemerkungen gemacht haben, insbesondere Frau Laura Keller und meinem Verleger Nicolas Witkowski. Dieses Buch verdankt ihrer Geduld und Kompetenz sehr viel. Mein Dank geht auch an den Schweizerischen Nationalfonds zur Förderung der Wissenschaftlichen Forschung und an Europa für die großzügige Finanzierung meines Labors sowie an die Universität Genf für die guten Arbeitsmöglichkeiten. Und schließlich danke ich der Vorsehung, die es mir gegeben hat, in einer für die Physik fabelhaften Zeit zu leben und einen – bescheidenen – Beitrag dazu zu leisten.

Nicolas Gisin

* * *

Der Übersetzer dankt Karin Richter (Martin-Luther-Universität Halle, Fachbereich Mathematik) für das Lesen der Korrektur und Gerd Richter (Angersdorf bei Halle) für die deutschsprachige Bearbeitung der Abbildungen. Frank Holzwarth (Springer Verlag Heidelberg) gab mir dankens-

werterweise Hinweise zur Erstellung der L_AT_EX-Fassung des Manuskripts. Dank für hilfreiche Bemerkungen geht an den Autor Nicolas Gisin (Universität Genf, Fachbereich für Angewandte Physik), an Heidrun Aspect (Genf) sowie an Matthias Freyberger (Universität Ulm, Institut für Quantenphysik). Bei Vera Spillner und Bettina Saglio (Springer Spektrum, Heidelberg) bedanke ich mich für weitestgehendes Entgegenkommen seitens des Verlages.

Manfred Stern, Halle a. d. Saale, August 2014

Inhaltsverzeichnis

Kastenverzeichnis	XXV
1 Einleitung	1
1.1 Wozu ist das gut?	5
2 Aperitifs	7
2.1 Newton: Eine so große Absurdität	7
2.2 Ein seltsames „nichtlokales Telefon“	10
3 Lokale und nichtlokale Korrelationen	17
3.1 Korrelationen	18
3.2 Das Bell-Spiel	24
3.3 Nichtlokaler Kalkül: $a + b = x \cdot y$	28
3.4 Lokale Strategien für das Bell-Spiel	31
3.5 Gewinnen im Bell-Spiel: nichtlokale Korrelationen	42
3.6 Gewinnen im Bell-Spiel gestattet keine Kommunikation	46
3.7 Boxen auf!	50
4 Nichtlokalität und echter Zufall	55
4.1 Eine nichtlokale Einheit	56
4.2 Telepathie und eineiige Zwillinge	58

4.3	Koordinieren bedeutet nicht kommunizieren . . .	60
4.4	Ein nichtlokaler Zufall	65
4.5	Ein „echter“ Zufall	67
4.6	Der echte Zufall gestattet Nichtlokalität ohne Kommunikation	70
5	Quantenklonen ist unmöglich	73
5.1	Quantenklonen impliziert unmögliche Kommunikation	75
5.2	Kann man DNA klonen?	78
5.3	Zwischenspiel: approximatives Klonen	79
6	Quantenverschränkung	83
6.1	Quantenholismus	83
6.2	Quantenunbestimmtheit	85
6.3	Quantenverschränkung konkret	86
6.4	Wie ist das möglich?!	88
6.5	Wie gewinnt man mit der Verschränkung das Bell-Spiel?	91
6.6	Quantennichtlokalität	94
6.7	Ursprung der Quantenkorrelationen	97
7	Ein Experiment	101
7.1	Erzeugung von Photonenpaaren	101
7.2	Erzeugung der Verschränkung	103
7.3	Quantenbitverschränkung	107
7.4	Das Experiment von Bernex-Bellevue	109
8	Anwendungen	113
8.1	Erzeugung von echten Zufallszahlen	114
8.2	Quantenkryptographie: Das Prinzip	117
8.3	Quantenkryptographie: Die Praxis	120

9	Quantenteleportation	123
9.1	Substanz und Form	124
9.2	Gemeinsame Messung	127
9.3	Protokoll der Quantenteleportation	132
9.4	Quantenfax und Quantenkommunikationsnetze	136
9.5	Kann man große Objekte teleportieren?	138
10	Ist die Natur wirklich nichtlokal?	141
10.1	Die Nichtlokalität bei Newton	142
10.2	Das Detektionsschlupfloch	144
10.3	Das Lokalitätsschlupfloch	148
10.4	Eine Kombination von Schlupflöchern?	154
10.5	Eine verborgene Kommunikation mit Überlichtgeschwindigkeit?	155
10.6	Alice und Bob messen jeweils voreinander	162
10.7	Hyperdeterminismus und freier Wille	165
10.8	Realismus	168
10.9	Das Multiversum	172
11	Aktuelle Forschungen zur Nichtlokalität	175
11.1	Kann man die Nichtlokalität „wiegen“?	176
11.2	Warum gewinnt man nicht jedes Mal im Bell-Spiel?	177
11.3	Nichtlokalität mit mehr als zwei Bestandteilen	181
11.4	Das „Free Will Theorem“	182
11.5	Ein verborgener Einfluss?	186
12	Schlussfolgerung	191
	Anmerkungen	199
	Sachverzeichnis	217

Kastenverzeichnis

Kasten 1 – Newton	8
Kasten 2 – Aufs Geratewohl	32
Kasten 3 – Die Bell-Ungleichung	39
Kasten 4 – John Bell	44
Kasten 5 – Eine Kommunikation ohne Übertragung ist unmöglich	47
Kasten 6 – Eine nichtlokale Berechnung	58
Kasten 7 – Determinismus würde eine Kommunikation ohne Übertragung implizieren	63
Kasten 8 – Die Heisenberg'sche Unschärferelation	74
Kasten 9 – Das „No-Cloning-Theorem“	77
Kasten 10 – Das Detektionsschlupfloch	147
Kasten 11 – Das Experiment von Satigny-Jussy	158

1

Einleitung

Von frühester Jugend an machen wir die Erfahrung, dass wir nur zwei Möglichkeiten haben, um mit einem Objekt zu interagieren, das sich außerhalb unserer Reichweite befindet. Entweder wir bewegen uns bis zu diesem Objekt hin, auf allen Vieren, wie ein Kleinkind, oder wir benutzen einen Gegenstand, zum Beispiel einen Stock, um unseren Arm zu verlängern und dadurch das Objekt zu erreichen. Wenn wir größer werden, erkennen wir, dass auch komplexere Mechanismen eingesetzt werden können – zum Beispiel zur Beförderung eines Briefes, den wir in einen Briefkasten werfen. Der Brief wird von einem Postangestellten abgeholt, manuell oder maschinell sortiert, mit einem Transporter, Zug oder Flugzeug befördert und schließlich dem Empfänger zugestellt. Das Internet, das Fernsehen und unzählige andere Beispiele aus dem Alltag lehren uns, dass sich jede Wechselwirkung und jede Kommunikation zwischen zwei voneinander entfernten Objekten kontinuierlich nach und nach ausbreitet – und zwar gemäß einem Mechanismus, der komplex sein kann, aber immer eine stetige Bahn beschreibt, die man zumindest im Prinzip in Raum und Zeit rückverfolgen kann.

Die Quantenphysik – die sich mit einer Welt beschäftigt, die wir nicht direkt wahrnehmen können – behauptet,