

2

Aperitifs

Bevor ich das zentrale Konzept dieses Buches vorstelle, möchte ich mit zwei kleinen Geschichten als Aperitif beginnen: die eine – wahre – Geschichte hat sich in der Vergangenheit ereignet, die andere ist noch Fiktion, könnte aber in nicht allzu ferner Zukunft wahr werden.

2.1 Newton: Eine so große Absurdität ...

Wir alle haben von Newtons universeller Gravitationstheorie gehört, gemäß der sich sämtliche Objekte in Abhängigkeit von ihrer Masse und ihrer Entfernung anziehen (genauer gesagt: in Abhängigkeit vom Kehrwert des Quadrates ihrer Entfernung voneinander, aber das ist für dieses Buch nicht wesentlich). Zum Beispiel ziehen Sonne und Erde einander mit einer Kraft an, welche die Fliehkraft ausgleicht und die Erde auf einer ungefähr kreisförmigen Umlaufbahn um die Sonne hält. Genauso verhält es sich mit den anderen Planeten, mit dem Paar Erde-Mond und sogar mit unserer Galaxie, die sich um das Zentrum eines Galaxiehaufens dreht. Wir wollen uns auf das Paar Erde-Mond konzentrieren: Woher weiß der Mond, dass er von der Erde

in Abhängigkeit von deren Masse und der Entfernung Erde-Mond angezogen werden muss? Wieso kennt der Mond die Masse der Erde und die Entfernung, die ihn von uns trennt? Benutzt er, so wie das eingangs erwähnte Kleinkind, eine Art Stock? Wirft er uns eine Art Kugeln zu? Findet irgendeine Kommunikation statt? Diese kindlichen Fragen sind äußerst ernst zu nehmen. Sie haben bereits den großen Newton aus der Ruhe gebracht, für den die Hypothese der universellen Schwerkraft, die ihn berühmt gemacht hat, so absurd war, dass kein vernünftiger Mensch ernsthaft daran glauben könne! (Kasten 1). Aber vorläufig reicht es zu wissen, dass Newtons Intuition richtig war, selbst wenn es noch Jahrhunderte dauerte und des ganzen Genies eines Einstein bedurfte (der Newtons Gravitationstheorie „ergänzte“), um die Antwort zu finden. Physiker wissen heute, dass die Fernwirkung, um die es bei der Gravitation oder bei der Wechselwirkung zwischen zwei elektrischen Ladungen geht, keineswegs augenblicklich erfolgt: Sie ergibt sich vielmehr aus der Versendung von Boten, so dass die obengenannte Hypothese der „Kugeln“ stimmt. Diese Boten sind kleine Teilchen, denen die Physiker Namen geben. Die Boten der Gravitation heißen Gravitonen, die der elektrischen Kräfte sind Photonen.

Kasten 1 – Newton¹

That Gravity should be innate, inherent and essential to Matter, so that one Body may act upon another at a Distance thro' a Vacuum, without the

mediation of any thing else, by and through which their Action and Force may be conveyed from one to another, is to me so great an Absurdity, that I believe no Man who has in philosophical Matters a competent Faculty of thinking, can ever fall into it.

Dass die Gravitation eine angeborene, inhärente und wesentliche Eigenschaft der Materie sein soll, so dass ein Körper auf einen anderen über eine Entfernung durch Vakuum hindurch und ohne die Vermittlung von etwas Sonstigem wirken soll, ist für mich eine so große Absurdität, dass ich glaube, dass kein Mensch, der eine in philosophischen Dingen geschulte Denkfähigkeit hat, sich dem jemals anschließen kann.

Seit Einstein beschreibt die Physik also die Natur als eine Gesamtheit von lokalisierten Objekten, die nur nach und nach wechselwirken können. Diese Vorstellung entspricht sowohl unserer als auch Newtons intuitiver Vorstellung von der Welt. Aber die heutige Physik ruht auch auf einem anderen theoretischen Pfeiler: auf der Quantenphysik, die die Welt der Atome und der Photonen beschreibt. Einstein war an dieser Entdeckung beteiligt. Er hat 1905 den photoelektrischen Effekt auf einen Beschuss mit Lichtteilchen (Photonen) zurückgeführt: Wie bei einem Boccienspiel schleudern die Photonen durch eine mechanische Wechselwirkung Elektronen aus der Oberfläche eines Metalls heraus. Aber als sich die Quantenphysik entwickelte und

formalisiert wurde, hat sich Einstein davon distanziert, denn er hatte schnell bemerkt, dass diese seltsame Physik wieder eine Art Fernwirkung einführt². Wie Newton drei Jahrhunderte zuvor verwarf Einstein diese Hypothese, die er für absurd hielt und als spukhafte Fernwirkung bezeichnete.

Die Quantenmechanik ist heute ein Grundpfeiler der Physik. Sie enthält tatsächlich eine Form der Nichtlokalität, die Einstein wahrscheinlich nicht gefallen hätte, auch wenn sie sich grundlegend von der Nichtlokalität Newtons unterscheidet. Diese Form der quantenphysikalischen Nichtlokalität ist außerdem experimentell sehr gut untermauert – sie hat sogar vielversprechende Anwendungen in der Kryptographie und lässt ein unglaubliches Phänomen zu: die Quantenteleportation.

2.2 Ein seltsames „nichtlokales Telefon“

Und nun eine kleine Science-Fiction-Geschichte, die aber nicht so futuristisch ist, wie es scheint. Die Technologie wird es nämlich bald ermöglichen, diese Geschichte wahr werden zu lassen.

Stellen wir uns eine „Telefon“-Verbindung zwischen zwei Partnern vor, die wir aus praktischen Gründen Alice und Bob nennen – in Anlehnung an die ersten zwei Buchstaben des Alphabets. Wie es manchmal vorkommt, ist die Verbindung schlecht: Man hört ein Rauschen. Die Verbindung ist sogar so schlecht, dass Alice nichts von dem hört, was Bob ihr sagen möchte; alles, was sie hört, ist ein anhaltendes Rauschen „chrzuskryprskrzypc-zykrt ...“. Bob hört ebenfalls

nur „chrzükscryprsrkrzypc-zykrt ...“. Auch wenn die beiden „Gesprächsteilnehmer“ noch so laut in ihren jeweiligen Hörer brüllen, auf ihn klopfen, sich in der Wohnung bewegen, soweit es das Hörerkabel zulässt – nichts tut sich. Ärgerlich! Unmöglich, mit Hilfe dieses Apparates zu kommunizieren, der die Bezeichnung „Telefon“ wahrlich nicht verdient.

Aber Alice und Bob sind Physiker: Sie zeichnen eine Minute des Rauschens auf, das aus ihrem Apparat kommt. Sie können sich damit gegenseitig beweisen, dass es sich ihrerseits nicht um Böswilligkeit handelt. Das Überraschende ist: Das von den beiden aufgezeichnete Rauschen stellt sich als absolut identisch heraus.

Da sie beide digitale Aufnahmegeräte verwenden, können Alice und Bob überprüfen und nachweisen, dass sämtliche Bits ihrer Aufzeichnungen absolut identisch sind. Unglaublich ... Die Quelle des Rauschens kann also nur auf den Telefonanbieter zurückzuführen sein oder befindet sich irgendwo in der Telefonleitung. Aus der perfekten Synchronisation schließen sie, dass sich die Quelle genau in der Mitte der Verbindung befinden muss, damit das Rauschen gleichzeitig bei Alice und bei Bob ankommt.

Alice und Bob beschließen also, ihre Hypothese zu testen, nämlich dass die Ursache des Rauschens wahrscheinlich ein Defekt elektronischen Ursprungs in der Mitte der Telefonleitung ist, die sie verbindet. Alice schlägt vor, ihre Leitung mit einem Kabel zu verlängern: Das Rauschen müsste dann bei ihr etwas später als bei Bob ankommen. Aber wieder tut sich nichts: Das Rauschen ist immer noch da und kommt bei beiden Gesprächsteilnehmern nicht nur identisch, sondern sogar perfekt synchron an. Bob schlägt

deswegen vor, die Telefonschnur zu zerschneiden. Aber das Rauschen geht unvermindert weiter!

Wie lässt sich ein solches Phänomen erklären? Dient die Telefonschnur etwa nur dazu, dass man den Hörer nicht irgendwo in der Wohnung verlegt? Handelt es sich vielleicht um ein schnurloses Telefon, das nur bequemlichkeithalber an eine Wand gehängt wurde? Oder sind es die Telefonhörer, die das Rauschen verursachen und nicht eine dazwischen liegenden Quelle? Ist es vielleicht die Explosion einer fernen Galaxie, die das Rauschen in beiden Empfängern auslöst? Wie lassen sich diese Hypothesen testen? Bob, der sich mit elektromagnetischen Wellen gut auskennt, zieht sich in einen Faraday'schen Käfig zurück, ein Metallgitter, das Radiowellen abschirmt – aber das Rauschen ist immer noch da. Alice schlägt vor, dass sie sich sehr weit voneinander entfernen: Dann müsste die Übertragungsqualität abnehmen und das Signal schließlich ganz verschwinden – unabhängig vom Mechanismus, mit dem die Hörer kommunizieren. Aber ein weiteres Mal tut sich absolut nichts.

Alice und Bob schließen daraus, dass ihre Telefonhörer eine sehr lange Rauschsequenz aufgezeichnet haben, von der sie jedes Mal, wenn sie den Hörer abheben, eine Teilsequenz reproduzieren – wobei die genaue Sequenz exakt in Abhängigkeit von der Uhrzeit gewählt wird. Damit wäre es nicht mehr überraschend, dass die beiden Telefonhörer immer das gleiche Rauschen erzeugen.

Voller Stolz auf ihre wissenschaftliche Vorgehensweise gehen Alice und Bob zu ihrem Physikprofessor, um ihm ihre Erkenntnis zu präsentieren. Der Professor beglückwünscht sie, fügt aber hinzu: „Die Hypothese, dass Ihre

Telefone das gleiche Rauschen aufgrund einer gemeinsamen Ursache erzeugen, und dass das gleiche Rauschen in Ihren beiden Telefonhörern aufgezeichnet wird, ist eine Hypothese, die man testen kann; man nennt das einen Bell-Test.“ Wir stellen die Bell-Tests im nächsten Kapitel vor. Begnügen wir uns einstweilen mit der Feststellung, dass Alice und Bob zu sich nach Hause hasten, um den Bell-Test mit ihren Telefonhörern durchzuführen, und dass der Test scheitert. Sie wiederholen das Experiment mehrmals, aber es gibt nichts daran zu rütteln. Die Hypothese einer gemeinsamen Ursache für das aufgezeichnete Rauschen in den beiden Telefonhörern ist hiermit widerlegt.

Alice und Bob fragen sich nun, welcher Mechanismus es ihren Telefonhörern ermöglicht, das gleiche Rauschen über eine große Entfernung zu erzeugen, und zwar ohne irgendeine Kommunikation und ohne dass es in ihren Hörern vorher aufgezeichnet worden wäre. Sie zermartern sich gehörig den Kopf, können sich aber nicht den geringsten Mechanismus vorstellen, mit dem sich das Phänomen erklären ließe. Sie kehren zu ihrem Professor zurück, der zu ihnen sagt: „Es ist nicht überraschend, dass Sie keinen Mechanismus gefunden haben, denn es gibt keinen; es geht hier nicht um Mechanik, sondern um Quantenphysik: Das Rauschen wird zufällig erzeugt, aber es handelt sich um einen echten Zufall; keines der Rausch-Bits existierte, bevor es die Telefonhörer in einem reinen Schöpfungsakt erzeugten. Dieser Quantenzufall ist außerdem in der Lage, sich gleichzeitig an mehreren Orten zu manifestieren, zum Beispiel in Ihren beiden Telefonhörern.“

Aber das ist nicht möglich, ruft Alice aus: Das Signal muss mit der Entfernung zwischen den zwei Geräten ab-

nehmen, sonst bedeutet das, dass man über beliebige Entfernungen kommunizieren könnte.

Außerdem, fügt Bob hinzu, würde die perfekte Synchronisation eine beliebig große Geschwindigkeit implizieren – ja sogar Überlichtgeschwindigkeit und das ist unmöglich.

Der Professor bleibt unerschütterlich: „Sie haben mir erzählt, dass sich das Rauschen nicht ändert, selbst wenn Sie in Ihr Telefon brüllen oder sich bewegen, sich um sich selbst drehen oder den Apparat schütteln. Sie sehen also: Die Tatsache, dass von beiden Seiten zufällig das gleiche Rauschen erzeugt wird, verhindert jegliche Kommunikation. Ihr „Gesprächspartner“ erfährt nichts von dem, was Sie gerade machen.“ Und er schließt: „Es besteht also kein Konflikt mit Einsteins Relativitätstheorie: Sie haben gerade nachgewiesen, dass keinerlei Kommunikation mit Überlichtgeschwindigkeit stattfindet.“

Alice und Bob bleibt der Mund offen stehen. Ihre seltsamen „Telefone“, die keine Kommunikation gestatten, sind also gar keine Telefone, selbst wenn sie so aussehen. Aber wie können sich diese aufeinander abstimmen, um ohne Kommunikation und ohne vorherige Verständigung immer das gleiche Ergebnis zu liefern? Und was bedeutet diese Geschichte mit dem „echten“ Zufall, der gleichzeitig an mehreren unterschiedlichen Orten auftreten kann? Bob meint schließlich: „Aber wenn das wirklich so ist, dann muss man das Phänomen irgendwie nutzen können; in diesem Fall werde ich etwas konstruieren und damit so lange herumspielen, bis ich verstehe, wie es funktioniert. Schließlich habe ich auf diese Weise verstanden, wie die Elektrizität funktioniert, wie die Flugbahn eines Balls mit einem Drall

verläuft und vieles andere mehr – letztlich habe ich alles, was ich jemals verstanden habe, auf diese Weise verstanden.“

Aber ja, erwidert der Professor, man kann das Phänomen zur Erzeugung von Zufallszahlen ebenso verwenden wie zur Sicherung von vertraulichen Informationen – für das, was man Quantenkryptographie nennt, und es kann sogar zur Quantenteleportation dienen. Aber zuerst müssen wir das zentrale Konzept dieses Buches verstehen: die Nichtlokalität. Sie wird sich uns über die Konzepte der Korrelation und des Bell-Spiels erschließen.



<http://www.springer.com/978-3-662-43957-9>

Der unbegreifliche Zufall
Nichtlokalität, Teleportation und weitere Seltsamkeiten
der Quantenphysik

Gisin, N.

2014, XXV, 223 S. 13 Abb., Hardcover

ISBN: 978-3-662-43957-9