

Teleportieren- Traum oder Wirklichkeit?

Johan Villaume,

f00-jvi@f.kth.se

20. Februar 2003

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	3
2	Die Quantentheorie	4
2.1	Der Einstein-Rosen-Podolsky (EPR) Effekt	5
2.2	Was bedeutet ERP?	6
3	Teleportierungsversuche	7
3.1	Weitere Anwendungen	8
4	Zusammenfassung	9
5	Bilderverzeichnis	10
6	Literaturhinweise	10

1 Einführung

Dieser Aufsatz behandelt das Teleportierungsphänomen. Zu einer ausführlicheren Erklärung des Phänomens müsste man einen viel längeren Aufsatz schreiben. Und auch das wäre nur ein kleiner Teil von allem, was es über Teleportieren zu schreiben gibt. Die Formeln, die ich benutzt habe werden nicht bewiesen. Die Beweise können in anderen Büchern gelesen werden.

Schon seit 1935 gab es eine Theorie die Teleportieren theoretisch möglich macht. Es dauerte aber bis 1998 um Teleportieren zu einer Realität zu machen. Doch wie viel wir mit der Hilfe von Teleportieren schaffen können, weiß bisher noch niemand.

Teleportieren ist immer noch zum großen Teil unerforscht, obwohl mehrere Experimente die Richtigkeit der Theorie schon bewiesen haben. Teleportieren wird noch lang in der Zukunft ein interessantes Thema sein, vielleicht könnten wir sogar die Galaxie mit Hilfe von Teleportation beherrschen.

2 Die Quantentheorie

Um das Teleportierungsphänomen verstehen zu können, müssen wir erst die Quantenmechanischen 'Spielregeln' beherrschen.

Aus der Quantentheorie sind zahlreiche Paradoxe entstanden, die unsere Wirklichkeitsauffassung verändert haben. Um die Theorie kurz zu beschreiben, könnte man sagen, dass die Theorie einen multidimensionalen Rahmen um die physikalische Welt mauert. Es gibt zum Beispiel eine Minimumenergie (dadurch auch eine Minimumgeschwindigkeit und so weiter) die wir nie verringern können. Der Rahmen ist jedoch so groß und multidimensional, dass andere Phänomene entstehen, die wir aus einer klassischen Perspektive nie für möglich gehalten hätten), die dann als Paradoxe bezeichnet werden.

Ein sehr zentrales Thema ist die so genannte 'Wellenfunktion' die mit Ψ bezeichnet wird. Ψ enthält alle Informationen über den Ausgang von Messungen an physikalischer Größen.¹ Zum Beispiel werden Position, Impuls und Spinrichtungen² gemessen. Man sagt, dass ein gemessenes Partikel (zum Beispiel ein Photon) sich in einem bestimmten *Zustand* befindet. Dieser Zustand wird zum Beispiel durch seine Energie gemessen. Wenn zwei Partikeln sich in genau demselben Zustand befinden, haben sie die selbe Wellenfunktion und sind dann auch nicht unterscheidbar. Ein sehr einfaches Beispiel kann unten gesehen werden. Die beiden Wellenfunktionen haben genau die selbe Amplitude. Die eine Wellenfunktion ist aber verschoben. Trotzdem sagt die Quantenmechanik, dass die beiden Partikeln genau gleich sind.

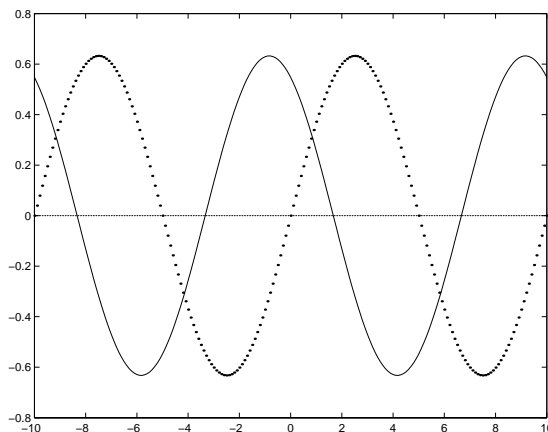


Abbildung 1: Zwei Wellenfunktionen in einem eindimensionalen Potentialkasten. Die beiden Funktionen haben die selbe Amplitude sind aber 30° verschoben.

Jedes Mal, wenn wir versuchen eine physikalische Größe zu messen, können wir nur einen Teil der Informationen aus Ψ holen. In der Wirklichkeit können wir nie die ganze Wellenfunktion wissen, sonst könnten wir leicht in die Zukunft sehen und die Welt wäre überhaupt nicht die selbe Welt, in der wir leben.

¹Zitat von http://geochron.geologie.univie.ac.at/physics/daten/kap_21/node7.htm

²Spin ist ein magnetisches Moment, siehe Quelle [6] Seite 66-67

Wenn wir etwas teleportieren, können wir trotzdem einen Zustand genau 'kopieren', weil wir während des Teleportierungsprozesses nie alles über das Teleportierungsobjekt wissen. Wir können nur wissen, dass wir genau dasselbe Objekt nach der Teleportierung haben wie vorher. Wir kommen sozusagen über die Brücke aber wissen nicht genau, welche Schritte wir unternommen haben.

Um den Teleportierungsprozess zu beschreiben, werde ich so genannte 'Dirac-Vektoren' benutzen. Ein gewisser Endzustand eines Partikels wird als $\langle \chi |$ geschrieben, und der Anfangszustand wird als $|\chi\rangle$ geschrieben. Das skalare χ ist eine gewisse Wellenfunktion, die von der Zeit unabhängig ist.

Nehmen wir an, dass wir eine Messung an einem Partikel machen. Nach der Definition der Wellenfunktion enthält Ψ alle möglichen Ergebnisse dieser Messung. Ψ besteht deshalb gleichzeitig aus vielen 'Zuständen.' Eine Messung gibt aber nur einen Zustand, darum wird ein so genannter 'Wellenfunktionskollaps' herbeigeführt. Eine Messung hat also eine destruktive Wirkung auf die Wellenfunktion des Partikels.

Es muss gesagt werden, dass die Quantentheorie nur brauchbar ist, wenn wir in dem Mikrokosmos (die Welt von Atomen, Photonen usw.) arbeiten. In unserer täglichen Welt würde die Quanten- und Klassische Physik fast übereinstimmen. Diese Unterschiede sind von uns nicht messbar (weil sie so klein sind) dass wir vorziehen mit der 'falschen' klassischen Theorie zu arbeiten (weil sie leichter ist). Trotzdem können wir nicht sagen dass die Quantentheorie für uns unwichtig ist, da alles in Atome und Elementarpartikeln zerlegt werden kann.

2.1 Der Einstein-Rosen-Podolsky (EPR) Effekt

Die Theorie ist im Jahr 1935 mit einer Publikation von Einstein, Rosen und Podolsky in der Zeitschrift 'Physical Review'³ aufgekommen. Dieser Artikel beschreibt einen Prozess, in dem wir so genannte "verschränkte Partikeln produzieren können. Sehen wir uns ein Beispiel davon an:

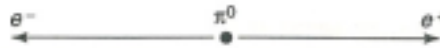


Abbildung 2: Ein Meson (siehe unten) wird in zwei Teile gespalten. Auf diese Weise werden verschränkte Partikeln produziert.

Hier haben wir ein 'Pi-Meson' (π^0), das in ein Elektron (e^-) und ein Positron (e^+ , positiv geladenes Elektron) gespalten werden kann. Insgesamt hatte das Pi-Meson einen Spin von 0. Jetzt hat das eine, sagen wir das Elektron, Spin $-h/4\pi$ (mit eine Wellenfunktion die einfach \downarrow geschrieben kann), dann hat das Positron Spin $+h/4\pi$ (die dann einfach \uparrow geschrieben wird), um insgesamt einen Spin von 0 zu haben (dass heißt die Wellenfunktion des Mesons ist die Summe $\downarrow + \uparrow$). Da das Elektron und Positron aus dem Pi-Meson kommen, sind die Spins 'korreliert', das heißt, wenn wir etwas über A wissen, wissen wir auch, dass B genau denselben Wert hat, nur mit einem anderen Vorzeichen. Das Paradoxale ist, dass der Spin der beiden Partikeln immer korreliert sind, was auch immer mit einem davon passiert. Quantenmechanisch sagen wir, dass das Elektron und

³Physical Review, 45, 777

das Positron die selbe Wellenfunktion teilen und dann in einem verschränkten Zustand, also völlig abhängig von einander sind.

Wir wissen aber nicht von Anfang an, in welche Richtung das Elektron geht, links oder rechts. Quantenmechanisch teilen das Elektron und das Positron diese Wellenfunktion:

$$\frac{1}{\sqrt{2}}(\uparrow_A \downarrow_B - \downarrow_A \uparrow_B) \quad (1)$$

Wobei die Pfeile die Spinrichtung anzeigen, (diese sind auch Wellenfunktionen). Wenn wir eine Messung machen und sehen, dass A (das Elektron zum Beispiel) einen Spin nach unten hat (\downarrow_A) wissen wir sofort dass das Positron (B) einen Spin nach oben hat (\uparrow_B).

Daraus können wir die Schlussfolgerung ziehen, dass wir alles über B wissen können, wenn wir nur Messungen an A machen. Wenn wir etwas mit A machen wird das B sofort beeinflussen (weil die Spins korreliert sind), egal ob A und B beieinander oder Lichtjahre voneinander entfernt sind!

2.2 Was bedeutet ERP?

Das ERP Paradox gibt uns einen theoretischen Grund, mit dem wir weiter arbeiten können, um wirklich teleportieren zu können. Es scheint völlig absurd dass zwei Partikeln sofort mit einander kommunizieren können. Wir dürfen aber nicht vergessen, dass die Quantentheorie auf eine Weise unphysikalisch ist. Es ist einfach ein Hilfsmittel um Phänomene verstehen zu können. Da die beiden verschränkten Partikeln abhängig von einander sind, könnte man sagen, dass sie quantenmechanisch immer noch eine Einheit ausmachen. Außer der wirklichen Welt, wo die Partikeln getrennt sind, gibt es einen abstrakten Raum, wo die beiden Partikeln immer noch dieselben Partikel sind, da sie die selbe Wellenfunktion teilen. In diesem Raum 'weiß' das eine Partikel genau, was mit dem anderen los ist. Dies wird Nichtlokalität genannt. Philosophisch könnte man sagen, dass der abstrakte Raum eine Zeit- Rauminvariante ist (das heißt, es hängt weder von Zeit noch Raum ab). Die ganze Zukunft der beiden Partikeln (die in diesem Raum eine einzige Wellenfunktion sind) ist hier bekannt, aber sie dürfen ihre Geheimnisse nie erzählen.

Wie kann jetzt der EPR Effekt Teleportieren ermöglichen? Wenn wir den Zustand eines Partikels von einer Stelle zu einer anderen vermitteln können, so dass das ursprüngliche Partikel zerstört wird, ist uns Teleportieren gelungen. Da das eine Partikel das andere unmittelbar beeinflussen kann, können wir tatsächlich einen Zustand von einer zu einer ganz anderen Stelle übertragen. Alles ohne die genaue Wellenfunktion des Partikels zu wissen!

3 Teleportierungsversuche

Normalerweise werden die verschränkten EPR-Paare durch ein Polarisationsfilter produziert. Dieser Prozess funktioniert aber genau wie die Spaltung von Pi-Mesonen. Photonen wurden auch bei der erste Teleportierungsversuch an die Technische Hochschule von Caltech im Jahr 1998 benutzt. Eine Skizze des Teleportierungsexperimentes kann unten gesehen werden:

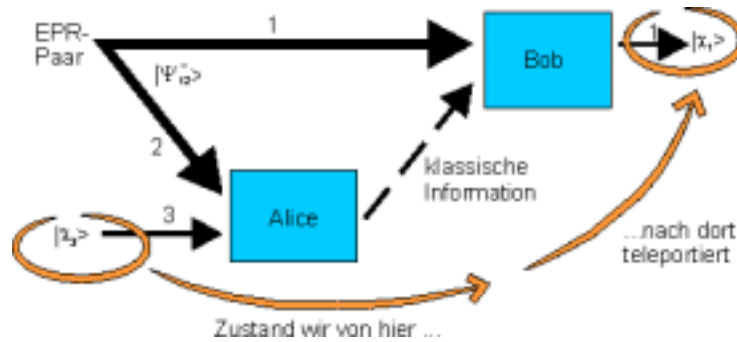


Abbildung 3: Drei Photonen (1, 2 und 3 genannt werden für eine Teleportierung benötigt. Alice ist eine Messungsstation und Bob empfängt die Messergebnisse (die klassische Information), die nachher auf Photon 1 wirkt.

Der Teleportierungsprozess kann in 5 Schritten beschrieben werden:

1. Wir produzieren ein EPR-Paar. Nehmen wir an, dass das Photon Nummer 1 nach rechts polarisiert ist (Wellenfunktion \downarrow_1). Photon Nummer 2 ist genau so stark wie 1 polarisiert, aber nach links (Wellenfunktion \uparrow_2). Mit anderen Worten sind Photonen 1 und 2 verschränkt und haben die Wellenfunktion:

$$|\Psi_{12}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow_1\downarrow_2\rangle - |\downarrow_1\uparrow_2\rangle) \quad (2)$$

2. Nehmen wir an, dass Photon Nummer 3 eine unbekannte Wellenfunktion

$$|\chi_3\rangle = a|\uparrow_3\rangle + b|\downarrow_3\rangle \quad (3)$$

hat. Die Zahlen a und b sind beliebig aber unbekannt (und konstant). Jedoch müssen a und b die Relation $|a|^2 + |b|^2 = 1$ erfüllen.

3. Photon 1 bewegt sich zu Bob, 2 zu Alice. Photon 3 wird auch zu Alice geschickt, wo es Photon 2 trifft und mit Photon 1 verschränkt wird. Plötzlich teilen alle drei Photonen die selbe Wellenfunktion $|\Psi_{123}\rangle = |\Psi_{12}\rangle|\chi_3\rangle$:

$$\begin{aligned} |\Psi_{123}\rangle = & \frac{a}{\sqrt{2}} (|\uparrow_3\rangle|\uparrow_1\rangle|\downarrow_2\rangle - |\uparrow_3\rangle|\downarrow_1\rangle|\uparrow_2\rangle) + \\ & + \frac{b}{\sqrt{2}} (|\downarrow_3\rangle|\uparrow_1\rangle|\downarrow_2\rangle - |\downarrow_3\rangle|\downarrow_1\rangle|\uparrow_2\rangle) \end{aligned} \quad (4)$$

Die Wellenfunktion oben besteht aus vier Teilsummen, das bedeutet, dass die Photonen 1, 2 und 3 sich in einem der 4 Zustände befinden, wenn man eine Messung machen würde.

4. Jetzt wird eine Messung in Alice gemacht (eine so genannte 'Bell- Messung'). Genau wie die Messung gemacht wird, liegt außerhalb die Fragestellung des Aufsatzes. Hier erfährt Photon 1, in welchem der vier Zustände oben sich Photon 3 befindet. Photon 2 weiß noch nicht das Ergebnis, da die Messung den Spin von Photon 1 nicht verändert.
5. Jetzt wird das Ergebnis von Alice zu Bob (Information von Photon 1 zu Photon 2) geschickt. Dabei benutzen wir ein einfaches Koaxialkabel. Dies ist die klassische Information in Figur 3. Also haben wir durch eine Mischung von klassischen (das Kabel) und quanten- mechanischen (die Verschränkung) Methoden den Zustand $|\chi_3\rangle$ teleportiert. Das Photon 3 verschwindet von Alice (die Wellenfunktion χ_3 hat einen totalen Kollaps erlitten) und taucht in Bob wieder auf.

3.1 Weitere Anwendungen

Teleportieren kann heute besonders für die Computerindustrie zu einer Revolution führen. Wenn man elektronische Kreise macht, benutzt man heutzutage Licht, um winzige Strukturen in das Halbleitermaterial einzuzäten. Jetzt sind diese Strukturen so klein geworden, dass sie ungefähr so groß wie die Wellenlänge des Lichts geworden sind. Optische Phänomene bewirken aber, dass es unmöglich ist, noch kleinere Kreise zu produzieren. Professoren wie Gunnar Björk an der Institution für Quantenoptik, KTH glauben, dass EPR-Paare dieses Problem lösen könnten. Ein verschränktes Photonenpaar hat die doppelte Masse wie ein Photon. Dadurch haben sie die halbe Wellenlänge. Wenn man noch mehrere Photonen verschränken könnte, gäbe es theoretisch keine Hindernisse dafür, wie klein die elektronischen Kreise werden könnten.⁴

Die Computerindustrie hat bereits schon ein 'Computer' hergestellt, der das Teleportierungsphänomen benutzt. Forscher bei IBM haben einen Computer gemacht, der aus einem Behälter mit eine Milliarde Milliarden (10^{18}) Molekülen besteht.⁵ Weil die Moleküle verschränkt sind, können sie gleichzeitig (man sagt oft 'parallele') Berechnungen ausführen. Dadurch verringert man die Berechnungszeit je mehr verschränkte Moleküle in dem 'Computer' sind. Man benutzt hier nicht gewöhnliche Bits (0 oder 1) sondern so genannte 'Qbits'. Diese Qbits sind genau wie die Photonen die oben beschrieben werden. Da haben wir ja zwei Spinnrichtungen (\downarrow und \uparrow) die genau wie gewöhnliche Bits verwendet werden können.

⁴<http://www.newscientist.com/hottopics/quantum/quantum.jsp?id=22901400>

⁵http://www.research.ibm.com/resources/news/20011219_quantum.shtml

Es gibt noch viele Bereiche, wo Teleportieren nützlich sein könnte. Die meisten davon liegen jedoch noch weit in der Zukunft. Zum Beispiel wäre das Teleportieren vielleicht praktisch für die Eroberung des Weltalls. Man könnte ein unbemanntes Raumschiff zu einem anderen Planeten schicken. Auf dem Raumschiff gibt es eine Empfängerstation mit vielen Partikeln, die mit Partikeln auf der Erde verschränkt sind. Jetzt braucht man nur den beschriebenen Teleportierungsprozess durchführen und die klassische Information über Radiofunk schicken. Auf diese Weise könnte man jetzt immer weiter ins Weltall vordringen. Abenteurer könnten dann mit Lichtgeschwindigkeit durch die Galaxie geschickt werden!

4 Zusammenfassung

Es ist uns wirklich gelungen Teleportieren durchzuführen. Viele Forscher versuchen jetzt Photonen zu teleportieren, die so weit wie möglich entfernt sind. Danach werden die Forscher bestimmt versuchen eine relativ große Menge Photonen zu teleportieren. Dabei muss man eine größere Menge Information durch das koaxiale Kabel zu schicken. Das Teleportieren einzelner Photonen ist Wirklichkeit geworden, aber die Komplexität wächst schnell ins Unmessbare. Der menschliche Körper enthält etwa 10^{28} Atome,⁶ die teleportiert werden müssten. Die einzelnen Atome wissen, wie sie zusammen gehören, aber wie man die Atome auf genau die selbe Stelle wie vorher bekommen kann ist unvorstellbar. Das Teleportieren von kleinen Partikeln ist Wirklichkeit geworden. Dadurch stehen große Möglichkeiten zur Verfügung, nicht nur für Reisen, sondern auch für die Computertechnik. Teleportieren wie es in den 'Star Trek' Serien beschrieben wird, wird aber lange noch ein Traum bleiben. Auch wenn wir in ferner Zukunft etwas Ähnliches durchführen könnten, würde die Vielfältigkeit der Natur durch endlose Komplikationen unsere wildesten Erwartungen übertreffen.

⁶<http://www.howstuffworks.com/teleportation.htm>

5 Bilderverzeichnis

1. Wurde mit MATLABR12 Student Version gemacht
2. Aus Quelle nr. 1, Seite 375
3. <http://www.cip.physik.uni-muenchen.de/~milq/teleportation/tele6p01.html>

6 Literaturhinweise

1. Introduction to Quantum Mechanics, David J. Griffiths, Prentice Hall, 1995, ISBN 0-13-124405-1
2. Quantum Theory, David Bohm, Dover Publications, 1951, Neudruck 1989, ISBN 0-486-65969-0
3. The Quantum World, J.C. Polkinghorne, Longman Publishers, 1984
4. Jakten på Schrödingers katt, John Gribbin, Ingenjörskörlaget 1984, ISBN 91-7284-205-9
5. Quantum Mechanics, Ashok Das und Adrian Melissinos, Goddard Breach Science Publishers 1986, ISBN 2-88124-053-4
6. Quantentheorie- Grundlagen, Methoden, Anwendungen, VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Schubert, Weber, 1980, Lizenz-Nr. 206 . 435/114/80, KTHB: 110 201 670 4
7. <http://www.howstuffworks.com/teleportation.htm>
8. http://www.ornl.gov/~webworks/cpr/pres/107480_.pdf
9. http://dir.yahoo.com/Science/Physics/Quantum_Teleportation/
10. http://xxx.larml.gov/PS_cache/quant-ph/pdf/9810/9810089.pdf
11. <http://www.cco.caltech.edu/~qoptics/teleport.html>
12. <http://www.cip.physik.uni-muenchen.de/~milq/teleportation>
13. http://www.research.ibm.com/resources/news/20011219_quantum.shtml