

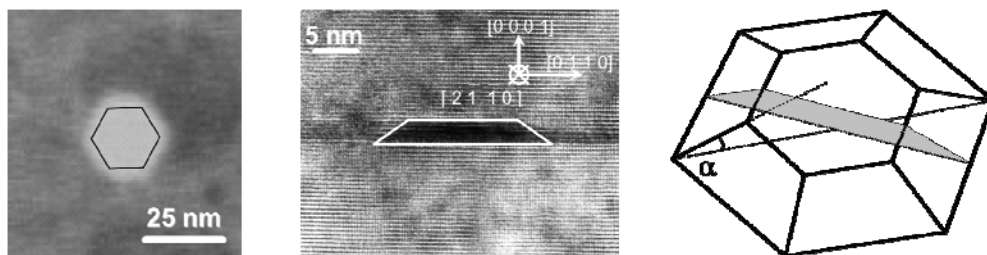
Mit Nano-Punkten auf dem Weg zum Doktorhut

Christian H. KINDEL
Technische Universität Berlin
Tokyo University

Einleitung

„Nano“ ist klein. Sehr klein. In den Durchmesser eines Haares passen ca. 10.000 Nano-Punkte, an denen ich 4 Jahre an der Universität von Tōkyō im Rahmen meiner Promotion geforscht habe. Die Nanowelt ist allgegenwärtig. Ultrahelle Leuchtdioden sorgen in der Beleuchtung von neuen Straßentunneln für den gewissen Star-Wars-Look, blaue Laserdioden ermöglichen das ultimative Heimkinoerlebnis mit Blue-ray Discs und Hochgeschwindigkeits-Infrarot-Laserdioden für die Datenkommunikation helfen dabei, dass das Internet noch schneller wird. Nano-Punkte, oder Quantenpunkte, verbessern die Effektivität und senken den Stromverbrauch dieser Technologien. Darüber hinaus werden Quantenpunkte in naher Zukunft auch einen Zugang zu völlig neuen Anwendungen der Quantenphysik geben. [1]

Quantenpunkte sind winzige Verunreinigungen von nanoskopischer Größe in einem Halbleiterkristall. Mikroskopaufnahmen einzelner Quantenpunkte, sowie ein Strukturmodell sind in Grafik 1 abgebildet. Die Verunreinigungen sind so klein, dass die Gesetze der Quantenmechanik voll zur Geltung kommen. Hierin besteht die große Besonderheit, denn durch den Einfluss der Quantenmechanik unterscheidet die Nanowelt sich wesentlich von der makroskopischen Welt des täglichen Lebens.



Grafik 1: (links) Blick von oben auf einen einzelnen Quantenpunkt per Rasterkraftmikroskop; (mitte) Querschnitt per Elektronenmikroskop; (rechts) hexagonales Strukturmodell

Schrödingers Katze in der Nanowelt

Zwei wichtige Prinzipien regieren die Nanowelt: Zum einen können sich Objekte nicht in beliebigen Zuständen befinden. Nur bestimmte, diskrete Energiezustände sind möglich. Zum anderen können zwei sich völlig widersprechende Zustände gleichzeitig existieren. Diese paradoxe Situation wird durch das Gedankenexperiment von Schrödingers Katze veranschaulicht. Eine Katze wird, nur theoretisch natürlich, zusammen mit einer Giftflasche in einen undurchdringbaren Kasten eingesperrt. Die Giftflasche kann sich mit einer Wahrscheinlichkeit von 50 % öffnen. Solange der undurchdringbare Kasten geschlossen bleibt, befindet sich die Katze quantenmechanisch in einem Zustand in dem sie gleichzeitig 50 % lebendig und 50 % tot ist. Öffnet man den Kasten, zerfällt dieser Zustand, und man sieht entweder eine tote oder eine lebendige Katze.

Abstrakt betrachtet ist Schrödingers Katze ein quantenmechanisches Zwei-Niveau-System aus den Zuständen „lebendig“ („ $|1\rangle$ “) und „tot“ („ $|0\rangle$ “). Die Quantenmechanik erlaubt, dass das System, solange es unbeobachtet bleibt, einen komplexen Überlagerungszustand (Superposition) aus $|1\rangle$ und $|0\rangle$ einnimmt. Misst man nun den Zustand des Systems (das In-den-Kasten-schauen), zwingt man es zurück in einen der beiden realen Zustände, entweder $|1\rangle$ oder $|0\rangle$.

Ein Zwei-Niveau-System lässt sich auch gut als sich drehende Münze veranschaulichen. Kopf ist $|0\rangle$, Zahl ist $|1\rangle$. Versetzt man die Münze mit einem Fingerschnipp in Drehung, erhält man eine Superposition: Die Münze zeigt weder Kopf noch Zahl, sondern in gewissem Sinne beides gleichzeitig. Der Messvorgang besteht nun darin, mit der Hand auf die Münze zu schlagen. Nach dieser Messung befindet sich die Münze wieder in einem realen Zustand, Kopf oder Zahl.¹



¹ Die Gemeinsamkeiten zwischen quantenmechanischem Zwei-Niveau-System und rotierender Münze sind erstaunlich. Die Zeitentwicklung des Quantenzustands gemäß der Schrödinger Gleichung entspricht tatsächlich einer Rotation im Raum der komplexen Zahlen. Auch die Tatsache, dass die Münze nach einiger Zeit von selbst auf einer Seite zum Liegen kommt, hat eine Entsprechung in der Quantenmechanik. Das Phänomen heißt hier Dekohärenz.

In der folgenden Tabelle sind die wichtigsten Begriffe und ihre Entsprechungen in den drei Modellen zusammengefasst.

	Schrödingers Katze	Quantenmechanisches Zwei-Niveau-System (Quantenbit)	Münze
<i>reale Zustände</i>	tot, lebendig	$ 0\rangle, 1\rangle$	Kopf, Zahl
<i>komplexe Superposition</i>	Schwebezustand aus Leben und Tod	$\alpha 0\rangle + \beta 1\rangle$	Münze rotiert auf Tisch
<i>Messung</i>	Kasten öffnen	physikalische Interaktion mit der Umwelt	auf die Münze schlagen

Tabelle: Quantenmechanische Begriffe und ihre Entsprechungen in verschiedenen Modellen

Quantenpunkte und Quantencomputer

Eine komplexe Superposition erscheint unglaublich für eine makroskopische Katze, lässt sich aber tatsächlich in einem Nanosystem realisieren, z. B. in einem Halbleiter Quantenpunkt. Erzeugt man in einem Quantenpunkt durch geschickte Anregung eine Superposition aus zwei sich widersprechenden Zuständen, z. B. „Elektron in Quantenpunkt“ und „kein Elektron in Quantenpunkt“, ergibt sich eine Situation, die genau dem Gedankenexperiment von Schrödingers Katze entspricht – nur wesentlich tierfreundlicher. Eine solche Superposition, ein Quantenbit, ist einer der Grundbausteine eines Quantencomputers. Im Gegensatz zu einem klassischen Computer, der mit 0 und 1 rechnet, arbeitet ein Quantencomputer mit Superpositionen aus 0 und 1. Bildlich gesprochen rechnet ein Quantencomputer nicht „1 + 1“ sondern „vielleicht 1 + möglicherweise auch nicht 1“.

Einer der wichtigsten Algorithmen, die erst durch einen Quantencomputer ermöglicht werden, ist der Faktorisierungsalgorithmus von Shor von 1994 [2]. Die Primfaktoren von z. B. der Zahl 15 zu finden ist einfach: 3 und 5. Bei der Zahl 9078634587634589736458076235907907833629743433979818454540136798467417365568913341322121721555532865817758189683211144546556389424193829163724642164289836356946728334526752682642642585313144603765461499755493684531218783213484684513216998787542373736681418617624189416738265416278941237989278941571 ist es deutlich schwieriger. Dieses Problem ist nur mit einem Quantencomputer lösbar.

Lichtteilchen

Ein einzelnes Lichtteilchen (Photon) wird auch als fliegendes Quantenbit bezeichnet. Mathematisch kann man den Zustand eines einzelnen Photons direkt mit dem Zustand einer Schrödingerkatze identifizieren. Der Informationsgehalt eines stationären Quantenbits im Quantenpunkt und eines Photons als fliegendem Quantenbit ist also gleich. Fliegende Quantenbits werden in der Quantenkryptographie verwendet, um einen sicher verschlüsselten Kommunikationskanal zwischen zwei Parteien aufzubauen [3].

In natürlichem Licht treten Photonen nie einzeln auf. Selbstverständlich ist es möglich, Licht so stark zu dämpfen, das *durchschnittlich* nur ein Photon pro Zeitintervall auftritt, aber es ist eine große Herausforderung einen Lichtstrom zu erzeugen, in dem *immer* nur je ein Photon pro Zeitintervall auftritt. Man kann sogar zeigen, dass es keine klassische Lichtquelle mit solcher Eigenschaft gibt (auch nicht Laserlicht!) [4]. Man benötigt ein einzelnes, diskretes Quantensystem wie z. B. ein einzelnes Atom als Quelle für einen Strom einzelner Photonen. Einzelne Atome zu handhaben ist ein höchst nicht-triviales Unterfangen. Es gibt jedoch eine erfolgreiche Alternative: Halbleiter Quantenpunkte. Gibt ein Quantenpunkt die in ihm gespeicherte Energie ab, sendet er ein einzelnes Photon aus. Für praktische Anwendungen muss eine Einzelphotonenquelle aus Quantenpunkten eine Vielzahl von Anforderungen erfüllen: Die Quelle muss sich elektrisch betreiben lassen, sie muss bei Zimmertemperatur funktionieren und schließlich muss sich die Quelle industriell günstig fertigen lassen. Während meiner Zeit in Japan habe ich Quantenpunkte eines speziellen Materials, Gallium Nitrid, untersucht, die einen Betrieb auch bei Zimmertemperatur ermöglichen. Ein Teil meines optischen Messaufbaus ist in Grafik 2 abgebildet. Obwohl die Linsen und Spiegel auf den ersten Blick unaufgeräumt auf dem Tisch zu stehen scheinen, hat jedes einzelne Element seine Funktion. Die Aufgabe ist vergleichbar damit, mit dem Licht einer in der Küche stehenden Kerze im Wohnzimmer ein Buch zu lesen. Auch dafür wäre wohl eine große Zahl Spiegel und Linsen nötig.

Mit diesem Aufbau war es mir möglich, einzelne Photonen aus Quantenpunkten zu untersuchen. Die Forschung an fliegenden Quantenbits bildet den Hauptteil meiner Doktorarbeit. Sie ist Teil des

größeren Projekts, einen Quantencomputer auf Basis von Quantenpunkten in naher Zukunft Wirklichkeit werden zulassen.



Grafik 2: Messanordnung für optische Untersuchungen an einzelnen Quantenpunkten

Quellen

- [1] D. Bimberg, M. Grundmann, and N. N. Ledencov, “*Quantum dot heterostructures*”, Wiley, Chichester (1999).
- [2] P. W. Shor, “*Algorithms for Quantum Computation: Discrete Logarithms and Factoring*,” Proceedings of the 35th Annual Symposium on Foundations of Computer Science, pp. 124–134 (1994).
- [3] C. H. Bennett and G. Brassard, “*Quantum Cryptography: Public Key Distribution and Coin Tossing*”, Proceedings of the IEEE International Conference on Computers, Systems, and Signal Processing, Bangalore, p. 175 (1984).
- [4] R. Loudon, “*The Quantum Theory of Light*”, Clarendon Pr., Oxford (1973).