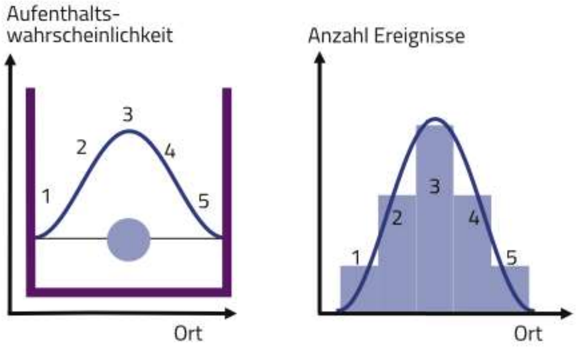
MORSEZEICHEN AUS DEM MIKROKOSMOS

Beim Tunneleffekt überwindet ein Teilchen eine Barriere, obwohl es nach klassischen Gesichtspunkten gar nicht genügend Energie dafür hat. Wir weisen Tunnelereignisse einzelner Elektronen als Lichtsignale auf einem Detektor nach – und werten diese mit statistischen Verfahren aus.



Links: Ein Elektron in einem Quantentopf mit seiner Wahrscheinlichkeitsamplitude für den Aufenthalt am Ort x = 1 bis 5.
Rechts: Entsprechende Wahrscheinlichkeitsverteilung für die Anzahl von Ereignissen „Elektron an Ort x" auf einem Detektor.

Quantenobjekte treten mal als Wellen, mal als Teilchen in Erscheinung. Wenn man einzelne von ihnen betrachtet, sind die daraus entstehenden Folgerungen manchmal überraschend, wie schon das einfache Beispiel einer metallbeschichteten Sonnenbrille zeigt: Die Gläser reflektieren einen Teil der einfallenden Strahlung und lassen einen anderen Teil hindurch. Stellt man sich das einfallende Licht als Welle vor, leuchtet ein, was passiert: Ein Teil von ihr läuft durch, ein Teil wird an den Metallatomen zurückgeworfen – ganz ähnlich wie Wasserwellen, die auf Hindernisse treffen.

Beschreibt man das Licht hingegen als einen Strom von Lichtteilchen – Photonen –, wird die Sache mysteriöser, denn Teilchen können nur entweder reflektiert oder hindurchgelassen werden – nicht teils, teils. Welches dieser Schicksale genau welches Photon ereilt, lässt sich aber nicht vorhersagen. Es lässt sich einzig die statistische Aussage treffen, dass ein Teil der Lichtteilchen die Metallschicht passiert, während ein anderer reflektiert wird.

Quantenobjekte haben sowohl Wellen- als auch Teilcheneigenschaften. Obwohl die beiden Beschreibungen sich nach unserem Alltagsverständnis ausschließen, werden sie doch beide benötigt, um Quantensysteme zu verstehen. Man spricht vom Welle-Teilchen-Dualismus.

In der Quantenphysik, bei der man es immer mit diesem *Welle-Teilchen-Dualismus* zu tun hat, ist man daher auf Statistik angewiesen, um aus Messungen einzelner Quantenobjekte Aussagen über ein System treffen zu können.

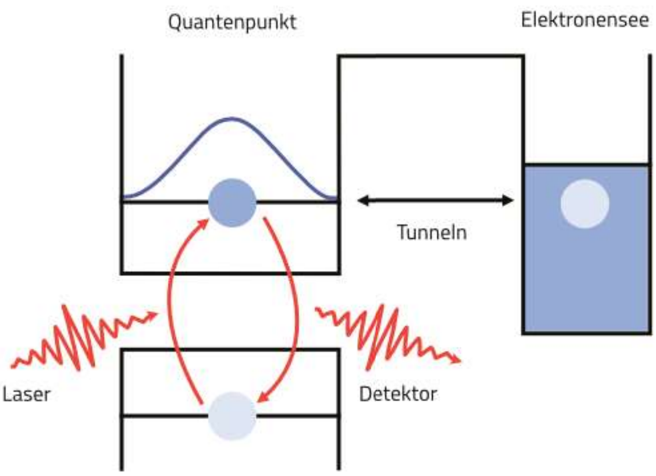
Ein weiteres Beispiel für die Relevanz von Statistik in Quantensystemen ist die Situation eines Elektrons, das in einem mikroskopisch kleinen Quantentopf gefangen ist – also einer energetischen Falle, die seine Bewegungsfreiheit einschränkt (siehe Abbildung). Die Wahrscheinlichkeitsverteilung im Quantentopf ist als durchgezogene blaue Linie dargestellt. Würde man nun an den Orten 1, 2, 3, 4 und 5 jeweils einen Elektronendetektor hinstellen und den Aufenthaltsort des Elektrons immer wieder messen, so würde sich die Statistik in der Abbildung daneben ergeben. Aus dieser Verteilung lassen sich dann Informationen über das quantenmechanische System gewinnen. Eine solche Verteilung kann in Abhängigkeit vom Ort, aber auch von der Zeit oder der Energie aufgenommen werden. Sie kann verschiedene Formen annehmen und eine Vielzahl von Informationen, etwa über Wechselwirkungen zwischen quantenmechanischen Teilchen wie Elektronen oder Photonen, enthalten.

EXPERIMENTE IM ELEKTRONENSEE

Eine der an diesem Projekt beteiligten Arbeitsgruppen beschäftigt sich experimentell mit der Nichtgleichgewichtsdynamik von einzelnen Elektronen und misst *Tunnelereignisse* mithilfe hochempfindlicher Photodetekto-

Der quantenmechanische Tunneleffekt erlaubt es kleinsten Teilchen, eine Barriere zu überwinden. Siehe auch Seite 39.

Quantenpunkte sind winzige Halbleiterstrukturen, in denen sich Elektronen nicht – wie in einem normalen Halbleiter – frei bewegen können. Stattdessen sind ihnen nur ganz bestimmte – „quantisierte" – Energieniveaus erlaubt – ganz ähnlich wie in einem Atom. Quantenpunkte sind ideale Modellsysteme, um unser Verständnis der Quantenmechanik zu überprüfen und für neuartige Bauelemente zu nutzen.



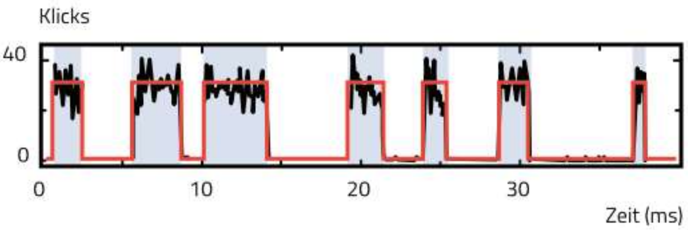
Das Schema veranschaulicht die Kopplung des Quantenpunktes an den Elektronensee. Die Elektronen können zwischen dem See und dem Quantenpunkt hin- und hertunneln. Mit Laserlicht kann detektiert werden, ob sich das Elektron im Quantenpunkt oder im Elektronensee befindet.

ren. Die andere Gruppe wertet diese Signale mit statistischen Methoden aus. Als experimentelles Quantenobjekt für diese Untersuchung dienen uns Elektronen, die in einem sogenannten *Quantenpunkt* eingeschlossen und durch eine energetische Barriere von einem See aus vielen Elektronen getrennt sind. Elektrische Kontakte erlauben durch das Anlegen von geeigneten Spannungswerten, einen Quantenpunkt mit einer präzisen Anzahl von Elektronen (0, 1, 2, 3, ...) zu befüllen. Aber was geschieht bei einem Spannungswert, der 0,5 Elektronen entspricht? Dann sind beide Zustände möglich – „leer" und „ein Elektron" – und es hüpfen immer wieder einzelne Elektronen aus dem See in den Topf und wieder zurück.

LICHT AN, LICHT AUS

Für die Messung, ob sich ein Elektron im Quantenpunkt befindet oder nicht, nutzen wir Laserlicht und einen hochempfindlichen Detektor, der in der Lage ist, einzelne Photonen zu erfassen. Das Licht kommt folgendermaßen ins Spiel: Ähnlich wie bei den charakteristischen Spektrallinien von Atomen bestimmt die Anzahl der Elektronen im Quantenpunkt, ob er sich mit Licht einer bestimmten Frequenz zum Leuchten anregen lässt oder nicht. Auf diese Weise lässt sich das zufällige Hin- und Hertunneln der Elektronen zeitlich verfolgen: Ist ein Elektron im Quantenpunkt, so gibt er Licht ab, wenn er durch den darauf abgestimmten Laser beleuchtet wird. Ist der Quantenpunkt leer, bleibt es dunkel. Es ergibt sich ein zufälliges Blinken – eine Art Morsecode aus Licht, der uns die Dynamik des Tunnelns eines einzigen Elektrons verrät.

Der Quantenpunkt ist in eine Halbleiterstruktur eingebettet und wird hier verdrahtet, sodass sich seine Eigenschaften durch Anlegen einer Spannung steuern lassen.



Die Messung einzelner Photonen (Anzahl der Klicks) auf dem Detektor zeigt, ob ein Elektron im Quantenpunkt ist oder nicht. Dies ergibt den Morsecode aus dem Mikrokosmos (rote Linie).

Die Länge der „An"- und „Aus"-Zeiten ist nicht immer genau gleich: Wie lange es also jeweils bis zum nächsten Tunneln dauert, ist nicht vorhersehbar. Lässt sich darüber also keine weitere Information gewinnen? Doch! Ähnlich wie bei der Sonnenbrille lässt sich der Zufall mithilfe der Statistik genauer untersuchen.

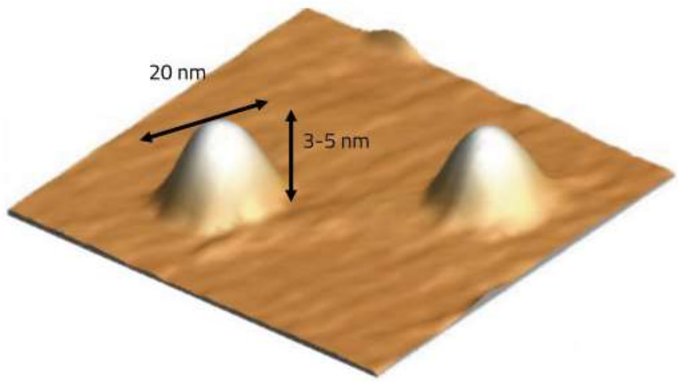
KLEINSTE ABWEICHUNGEN HERAUSKITZELN

Misst man das Rein- und Raustunneln der Elektronen in den Quantenpunkt in der Situation, wo nur die zwei Zustände „leer" oder „ein Elektron" möglich sind, so ergibt sich eine Verteilung, die schmaler ist als eine Poissonverteilung (siehe Kasten rechts). Das Verhältnis der Breite der Verteilung zu ihrem Mittelwert – der sogenannte Fano-Faktor – beträgt dabei 0,5. Würde es sich bei den tunnelnden Elektronen um einen reinen Zufallsprozess handeln, hätte ein Fano-Faktor von 1 herauskommen müssen. Das ist aber nicht der Fall. Das Rein- und Raustunneln der Elektronen sind also nicht rein zufällig, sondern voneinander abhängig oder korreliert. Ein Elektron kann nur aus dem Quantenpunkt raustunneln, wenn es vorher im Quantenpunkt war. Und umgekehrt kann ein Elektron nur in den Quantenpunkt reintunneln, wenn dieser vorher durch Raustunneln eines Elektrons leer war. Die Korrelation zwischen Rein- und Raustunneln führt in Modellrechnungen tatsächlich zu einem Fano-Faktor von 0,5. Damit ist belegt, dass es sich bei dem untersuchten Prozess tatsächlich um Quantensprünge einzelner Elektronen handelt, und dass bei der entsprechenden Spannung tatsächlich auch nur maximal ein Elektron auf den Quantenpunkt passt.

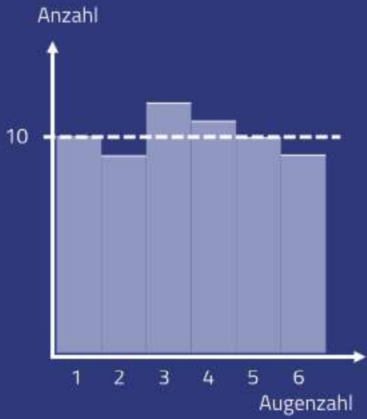
Bei der statistischen Auswertung gibt es neben dem Mittelwert und der Breite der Verteilung noch höhere Kumulanten (siehe Kasten rechts), in denen weitere Informationen stecken – insbesondere, wenn es gelingt, auch feine Details in den statistischen Verteilungen auszuwerten. Allerdings gibt es dabei ein Problem: Kumulanten beschreiben Abweichungen von der Gaußverteilung – aber bereits die Zählstatistik beim Würfeln und die allgegenwärtige Poissonverteilung unterscheiden sich schon deutlich von der Gaußverteilung. Die Abweichungen wären also ohnehin groß und könnten die gesuchten Phänomene überdecken.

Abweichungen von der Poissonstatistik lassen sich mit einem relativ neuen statistischen Werkzeug, den sogenannten faktoriellen Kumulanten, viel besser beschreiben – weshalb wir diese zur besonders präzisen und aussagekräftigen Analyse der Quantenereignisse eingesetzt haben. Genauso wie für die Kumulanten gibt es für die faktoriellen Kumulanten mathematische Vorschriften, wie sie aus den experimentellen Werten berechnet werden. Faktorielle Kumulanten haben den Vorteil, dass alle ungewollten statistischen Schwan-

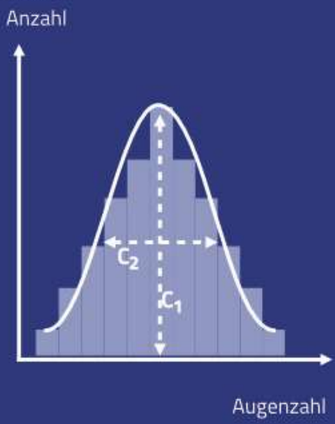
Leuchtende Quantenpunkte in einem Laborgefäß.



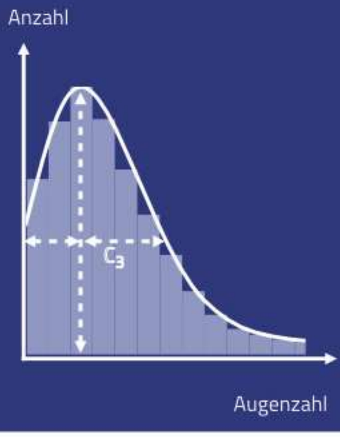
Gleichverteilt:



Gauß:



Poisson:



MIT STATISTIK ZUR CHARAKTERISTIK

Wie in der Statistik charakteristische Größen ermittelt werden, kann man sich am Alltagsbeispiel eines Würfelspiels klarmachen. Würfelt man mit einem Sechserwürfel (im gezeigten Beispiel 60-mal), so ist die Anzahl der Ereignisse für eine bestimmte Augenzahl des Würfels gleichverteilt. Alle Zahlen sind gleich wahrscheinlich und es gibt nur eine statistische Schwankung um den Mittelwert. Das ändert sich bei der Summe von zwei unabhängigen Würfeln. Hier sind manche Werte wahrscheinlicher als andere, weil es mehr Kombinationsmöglichkeiten dafür gibt.

Würde man nun mit unendlich vielen Würfeln werfen und eine entsprechende Wahrscheinlichkeitsverteilung der Anzahl der auftretenden Würfelzahlergebnisse auftragen, so würde sich eine sogenannte Gauß-Verteilung ergeben (siehe mittlere Abbildung). Diese glockenförmige, symmetrische Verteilung weist ein Maximum beim Mittelwert auf und hat um dieses Maximum herum eine gewisse Breite. Der Mittelwert heißt auch erste Kumulante C_1, während die zweite Kumulante C_2 ein Maß für die Breite der Verteilung ist. Der Quotient dieser beiden wichtigen Größen wird auch Fano-Faktor genannt.

Nun gibt es aber auch noch Wahrscheinlichkeitsverteilungen, die sich nicht mehr mit einer Gauß-Funktion beschreiben lassen. Angenommen, ein Würfel hat auf fünf Seiten eine Null als Augenzahl und auf einer Seite eine 6. Wenn man damit sehr oft würfelt, erhält man einen Mittelwert von 1. Die Verteilungsfunktion ist dann asymmetrisch um diesen Mittelwert. Diese asymmetrische Wahrscheinlichkeitsverteilung kann durch eine sogenannte Poissonverteilung beschrieben werden. Sie besitzt eine weitere Kumulante C_3, die Schiefe, als Maß für die Abweichung von einer symmetrischen Verteilung.

kungen, die üblicherweise poissonverteilt sind, die statistische Auswertung kaum verfälschen. Die Auswertung der Morsezeichen wird dadurch viel robuster gegen störende Einflüsse wie übersehene Quantensprünge (weil der Detektor nicht angesprungen ist), Geisterereignisse (weil der Detektor falsch ausgelöst hat) oder übliche Rauschquellen in der Elektronik.

Dadurch war es nun möglich, weitere physikalische Effekte in den zunächst kryptischen Morsezeichen der Quantensprünge zu entschlüsseln – etwa die Änderung des Spins, also der Eigendrehung von Elektronen. Manchmal ist es tatsächlich so, dass Rauschen und andere statistische Schwankungen nicht störend wirken, sondern überhaupt erst die zugrundeliegende Physik preisgeben. So wie es einer der Pioniere der Informationstheorie, Rolf Landauer, einmal formulierte: „The noise is the signal" („Das Rauschen ist das Signal").

Leitung der Projekte: Martin Paul Geller, Jürgen König, Axel Lorke, Björn Sothmann