

Populärwissenschaftliche Zusammenfassung auf Deutsch

Im Gegensatz zu dem, was Lehrer früher sagten, tragen wir fast immer einen Taschenrechner bei uns. Mit einer Rechenleistung, die ein Vielfaches dessen beträgt, was für die Mondlandung verwendet wurde, sind unsere Mobiltelefone für das Überprüfen unserer Kopfrechenaufgaben, mehr als ausreichend. Diese Leistung beruht zu einem großen Teil auf unserer Fähigkeit, immer kleinere elektrische Schaltkreise und Komponenten herzustellen. Wir erreichen Größenskalen, bei denen wichtige Teile dieser Komponenten nur noch aus wenigen Atomen bestehen. Bei diesen Größenskalen ist das klassische Bild eines elektrischen Stroms nicht mehr unbedingt eine vollständige Beschreibung des Geschehens. Wir müssen quantenmechanische Effekte berücksichtigen, um die Vorgänge vollständig zu verstehen. Die Quantenmechanik ist die Theorie, die verwendet wird, um die seltsame Welt der einzelnen Elektronen und Atome zu beschreiben. Natürlich lässt sich dies auch umkehren: Die Fähigkeit, winzige Systeme zu schaffen und zu kontrollieren, ermöglicht es uns, nach neuen und interessanten quantenmechanischen Effekten zu suchen, die wir sonst nicht sehen würden. Vielleicht lassen sich diese Effekte auch nutzen, um bessere Geräte zu bauen. In dieser Arbeit untersuchen wir theoretisch zwei Beispiele dafür, was passieren kann, wenn die Systeme in allen drei bzw. nur einer räumlichen Dimension klein werden.

Um diese Zusammenfassung ein wenig unterhaltsamer zu gestalten, erzählen wir eine Geschichte über Elektronen und wie sie durch die Welt reisen. Elektronen haben überraschend viele Eigenschaften mit uns Menschen gemeinsam. Zum Beispiel haben sie ein starkes Bedürfnis nach persönlichem Freiraum. Da sie negativ geladen sind, stehen sie nicht gern dicht beieinander. Dies wird als *Coulomb-Abstoßung* bezeichnet. Wenn die Elektronen auf eine nette kleine tropische Insel in den Urlaub fahren, hüpfet das erste Elektron ganz einfach darauf. Das zweite Elektron braucht jedoch viel Überzeugungsarbeit, um den Platz mit dem bereits vorhandenen Elektron zu teilen. Wir nennen diese kleinen Inseln *Quantenpunkte*. Die größeren Landmassen, auf denen die Elektronen ihre Nichturlaubszeit verbringen, sind die *elektronischen Kontakte*. Auf diesen Kontakten lebt eine unglaublich große Anzahl von

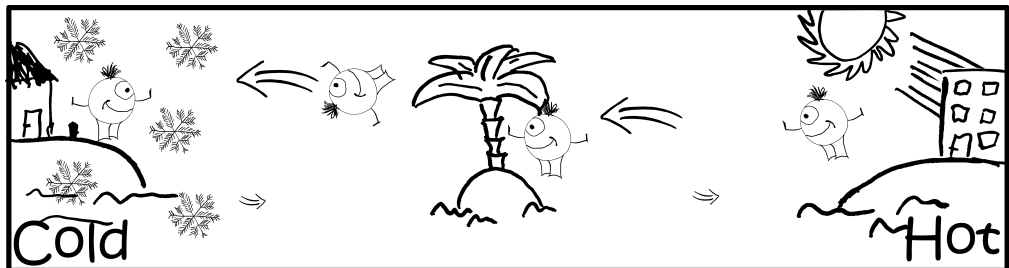


Abbildung A: Elektronen hüpfen zwischen den kalten (links) und heißen (rechts) Hauptlandmassen und der Insel in der Mitte.

Elektronen. Wenn sich zwei dieser großen Landmassen in der Nähe der Insel befinden, springen gelegentlich einige Elektronen auf die Insel, dies ist der berühmte *Tunneleffekt*. Manchmal springen sie auch auf die andere Seite, wie man in Abb. A sehen kann. Wenn genügend Elektronen in eine Richtung springen, entsteht ein Strom, den wir messen können. Der Strom kann von vielen Dingen abhängen, z. B. davon, wie weit die Insel vom Festland entfernt ist, also wie leicht es für die Elektronen ist, zu springen. Dies nennt man die *Tunnelkopplung*. Weitere Faktoren sind die Höhe der Insel, die Energie des so genannten *Punktlevels*, und auch die Anzahl der Elektronen auf dem Festland, das chemische Potenzial des Kontakts. Wenn sich auf einer der Hauptlandmassen viel mehr Elektronen befinden, springen die Elektronen auf der Insel mit größerer Wahrscheinlichkeit auf die weniger bevölkerte Seite. Der Unterschied in der Bevölkerung zwischen den Hauptlandmassen wird als *Potentialdifferenz* oder *Spannung* bezeichnet.

Wir können die Ausgangssituation auf viele Arten verändern. Was passiert, wenn wir zwei Inseln zwischen die Hauptländer setzen? Das wird als *Doppelquantenpunkt* bezeichnet. Wie reagiert diese Anordnung, wenn wir den Abstand zum Hauptland oder die Höhe der Inseln leicht verändern? Dies entspricht einer Änderung der Tunnelkopplungen bzw. des Punktlevels. Wenn wir auf dem Festland sitzen und zählen, wie viele Elektronen von der Insel kommen, können wir dann etwas über eine dritte Insel erfahren, die sich in der Nähe befindet? Wenn wir zum Beispiel herausfinden, ob sich auf der dritten Insel Elektronen befinden, nennt man das einen *Ladungssensor*. Dies ist das Thema des Artikels 1, in dem wir einen parallelen Doppelpunkt und mögliche Anwendungen als Ladungssensor untersuchen.

Bislang haben wir uns nicht wirklich um das Wetter gekümmert. Welchen Weg werden die Elektronen einschlagen, wenn es auf der einen Seite der Insel sehr heiß und auf der anderen Seite sehr kalt ist, wie in Abb. A? Wenn wir die Elektronen überzeugen können, auf die Seite mit mehr Elektronen zu springen, haben wir die Wärme der heißen Seite genutzt, um elektrische Arbeit zu verrichten. Dies ist das Konzept eines Wärmemotors. Was wäre, wenn wir die Insel und das Festland nahe genug zusammenbringen, so dass sich zwei Elektronen gegenseitig absprechen und ihre Sprünge koordinieren können, oder eines von ihnen in sehr kurzer Zeit zweimal springen kann? Die Prozesse, bei denen zwei koordinierte Sprünge stattfinden, werden als *cotunneling*-Ereignisse bezeichnet. Wenn man diese Anordnungen zwischen Elektronen zulässt, ändert sich nicht nur die durchschnittliche Anzahl der springenden Elektronen, der *Strom*, sondern auch das *Rauschen* um diesen Mittelwert. Das Rauschen wird auch als *Fluktuationen* bezeichnet. Es wirkt sich auch auf den *Wirkungsgrad* der Wärmekraftmaschine aus. In Papier II untersuchen wir diese Effekte und betrachten auch ein Zusammenspiel zwischen dem Strom, dem Rauschen und dem Wirkungsgrad in den sogenannten *thermodynamischen Unschärferelationen*.

Natürlich halten sich nicht alle Elektronen die ganze Zeit in der Nähe dieser kleinen Insel im Meer auf. Einige von ihnen haben einen festen Arbeitsplatz und müssen entlang einer Küstenstraße pendeln, mit dem Meer auf der einen und einer unwegsamen Landschaft



Abbildung B: Illustration der Küstenautobahn mit den seltsamen Verkehrsregeln: rote Autos dürfen nur rechts fahren, blaue Autos links in die entgegengesetzte Richtung. Die Bodenwellen sind orange eingezeichnet.

auf der anderen Seite, wie in Abb. B skizziert. Auf dem Highway gelten auch besondere Verkehrsregeln: In der einen Richtung dürfen nur blaue Autos fahren, in der anderen nur rote. Man nennt diese Regel *Spin-Impuls-Kopplung* und die Länder, in denen das passiert, *topologische Isolatoren*. In diesen ganz besonderen Ländern sind die Elektronen auch sehr umweltbewusst und müssen Fahrgemeinschaften bilden. Sie haben auch etwas komische Autos. Je nachdem, welche Sitze im Auto besetzt sind, ist die Farbe des Autos entweder rot oder blau. Diese Eigenschaft wird als *Spinprojektion* bezeichnet und bestimmt, in welche Richtung sich die Elektronen bewegen dürfen. Wenn das Auto auf eine Bodenwelle stößt, man nennt sie *magnetische Verunreinigungen*, werden die Elektronen manchmal von ihren Sitzen hochgeschleudert. Wenn sie sich nach diesem *Streuungsereignis* an verschiedenen Orten niederlassen, kann das Auto seine Farbe ändern. Wenn sie auf der Autobahn auf eine Bodenwelle stoßen und das Auto seine Farbe ändert, müssen sie natürlich umdrehen. Das kann den Verkehr ziemlich herausfordernd machen. Wenn ein Auto an einem Ende der Küstenautobahn einfährt, wird die Wahrscheinlichkeit, es auf die andere Seite zu schaffen, als *Transmission* bezeichnet. In Papier III sehen wir uns an, wie sich die Bodenwellen auf den Verkehr auswirken und wie wahrscheinlich es ist, dass die Elektronen dort ankommen, wo sie eigentlich hinwollen. Und weil das noch nicht seltsam genug ist, lassen wir die Bodenwellen auch noch rotieren.

Mit dieser Arbeit hoffen wir, einen Beitrag zum Verständnis der Reisegewohnheiten von Elektronen zu leisten, damit sie in dieser seltsamen und wunderbaren Quantenwelt, in der wir und die Elektronen leben, genutzt werden können. Die Urlaubs- und Fahrgemeinschaftsgewohnheiten von Elektronen könnten in Zukunft in vielen technischen Anwendungen genutzt werden. Von der Nutzung von Quanteneffekten, um die bestehende Elektronik effizienter zu machen, bis hin zur Verwendung von Quanteneffekten, um Dinge zu messen, die wir bisher nicht messen konnten, oder sogar zur Entwicklung völlig neuer Arten von Computern - vieles scheint möglich.