Der Tunneleffekt

QUANTENEFFEKT · VON DER SONNE BIS ZUM USB-STICK

Die Sonne dürfte eigentlich nicht leuchten. Jedenfalls nicht, wenn man nur die Physik benutzt, die vor 1925 bekannt war. In ihrem Kern herrschen rund 15,7 Millionen Kelvin [1], das klingt nach viel, aber für die Kernfusion reicht es bei Weitem nicht. Damit zwei Wasserstoffkerne verschmelzen, müssen sie sich bis auf etwa ein Femtometer nähern, und auf diesem Weg stoßen sie sich wegen ihrer positiven Ladung mit rund 1,4 Millionen Elektronenvolt ab. Die mittlere Bewegungsenergie der Kerne bei 15,7 Millionen Kelvin beträgt aber nur etwa 1,4 Kiloelektronenvolt, tausendmal weniger. Nach klassischer Rechnung kommt so gut wie kein Kernpaar über diesen Berg.

Dass die Sonne trotzdem scheint, verdanken wir einem der merkwürdigsten Effekte der Quantenphysik. Die Kerne müssen nicht über den Berg. Sie können hindurch.

Durch die Wand statt darüber

Stellen Sie sich eine Kugel vor, die auf einen Hügel zurollt. Ist sie zu langsam, rollt sie ein Stück hinauf, kehrt um und kommt zurück. Auf der anderen Seite des Hügels taucht sie nie auf, das ist so sicher wie nur irgendetwas in der Physik. Für ein Elektron oder einen Atomkern gilt das nicht. Ihr Verhalten beschreibt eine Wellenfunktion, und die bricht an der Barriere nicht einfach ab. Sie dringt hinein und wird dabei immer schwächer, ähnlich wie Licht in trübem Wasser. Ist die Barriere dünn genug, bleibt auf der anderen Seite ein kleiner Rest übrig (Abb. 1). Und weil das Quadrat der Wellenfunktion die Wahrscheinlichkeit angibt, das Teilchen dort zu finden, taucht es dort tatsächlich gelegentlich auf. Es ist durch eine Wand gegangen, für die es eigentlich zu wenig Energie hatte.

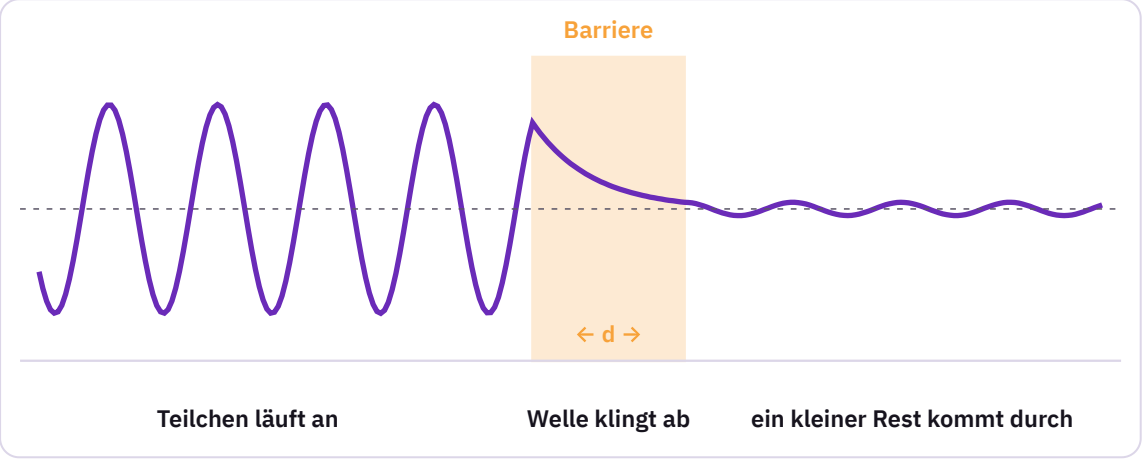


Abb. 1: Was mit der Welle an der Barriere passiert. Innerhalb der Barriere fällt sie exponentiell ab, dahinter läuft sie mit kleinerer Amplitude weiter. Eigene schematische Darstellung.

Wie wahrscheinlich das ist, hängt vor allem von zwei Dingen ab: wie dick die Barriere ist und wie viel Energie dem Teilchen fehlt. Für eine Barriere der Dicke *d* gilt näherungsweise

$$T \approx e^{-2\kappa d} \tag{1}$$

mit der Abklingkonstante

$$\kappa = \frac{\sqrt{2m(V_0 - E)}}{\hbar} \tag{2}$$

Darin stehen die Masse *m* des Teilchens, die Höhe V_0 der Barriere und die Energie *E*, die das Teilchen tatsächlich hat. Die Exponentialfunktion macht den Effekt extrem empfindlich. Fehlt einem Elektron ein einziges Elektronenvolt, kommt es durch eine Barriere von einem halben Nanometer noch etwa in jedem 170. Versuch hindurch. Bei einem Nanometer ist es nur noch etwa jeder 28 000. Versuch, bei zwei Nanometern nur noch etwa einer von 800 Millionen (Abb. 2). Für einen Tennisball und eine Mauer kommt eine Zahl heraus, die so klein ist, dass man sie nicht sinnvoll aufschreiben kann.

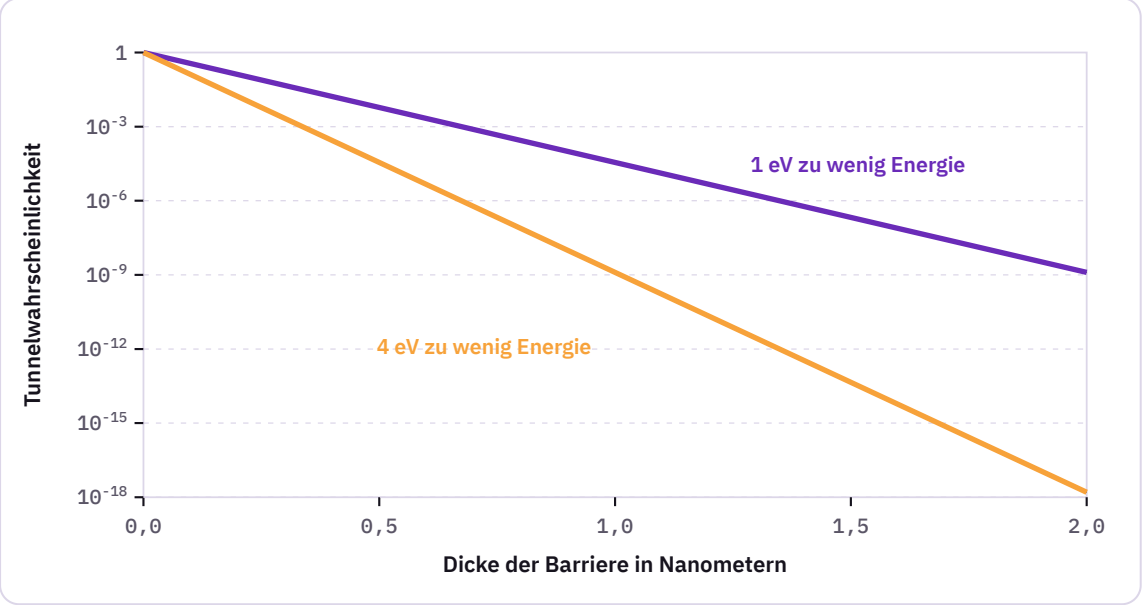


Abb. 2: Tunnelwahrscheinlichkeit eines Elektrons nach Gleichung (1), für zwei verschieden hohe Barrieren. Die senkrechte Achse ist logarithmisch: Jeder Teilstrich bedeutet einen Faktor tausend. Eigene Berechnung.

Ein Rätsel aus dem Atomkern

Erkannt hat man den Tunneleffekt nicht an der Sonne, sondern am radioaktiven Zerfall. Manche schweren Kerne senden Alphateilchen aus, Pakete aus zwei Protonen und zwei Neutronen. Schon 1911 war Hans Geiger und John Mitchell Nuttall ein seltsamer

Zusammenhang aufgefallen: Kerne, die energiereiche Alphateilchen abgeben, zerfallen schnell, solche mit energiearmen extrem langsam [2]. Der Unterschied ist gewaltig. Uran-238 hat eine Zerfallsenergie von 4,27 MeV und eine Halbwertszeit von 4,5 Milliarden Jahren. Polonium-212 hat mit 8,95 MeV gut das Doppelte und eine Halbwertszeit von 0,3 Mikrosekunden [3]. Ein Faktor zwei in der Energie, mehr als 23 Zehnerpotenzen in der Zeit.

1928 fanden George Gamow in Göttingen und unabhängig davon Ronald Gurney und Edward Condon in Princeton die Erklärung [4],[5]. Das Alphateilchen sitzt im Kern hinter einem Wall aus elektrischer Abstoßung, der viel höher ist als seine Energie. Es kommt nur durch Tunneln heraus. Etwas mehr Energie macht die Barriere niedriger und dünner, und wegen der Exponentialfunktion steigt die Tunnelwahrscheinlichkeit dann enorm. Die Geiger-Nuttall-Regel folgte damit aus der neuen Quantenmechanik, und das war einer der ersten großen Erfolge der Theorie außerhalb der Atomhülle.

Robert Atkinson und Fritz Houtermans drehten die Überlegung 1929 um: Wenn Teilchen aus einem Kern heraustunneln können, dann können sie auch hineintunneln [6]. Genau das passiert im Inneren der Sonne. Die Wahrscheinlichkeit für ein einzelnes Protonenpaar ist winzig, aber es gibt unvorstellbar viele davon, und so reicht es, damit die Sonne seit rund 4,6 Milliarden Jahren gleichmäßig brennt, ohne zu explodieren.

Ein Mikroskop, das Atome ertastet

Die extreme Empfindlichkeit des Effekts kann man auch ausnutzen. Gerd Binnig und Heinrich Rohrer bauten Anfang der 1980er-Jahre im IBM-Labor bei Zürich ein Gerät, bei dem eine feine Metallspitze bis auf weniger als einen Nanometer an eine Oberfläche herangefahren wird [7]. Zwischen Spitze und Probe liegt dann nur noch ein winziger Spalt, durch den Elektronen tunneln, wenn man eine kleine Spannung anlegt.

Weil die Elektronen dabei mehrere Elektronenvolt Austrittsarbeit überwinden müssen, ändert sich der Tunnelstrom schon dann um fast eine Größenordnung, wenn sich der Abstand um ein Zehntel Nanometer ändert. Das ist weniger als der Durchmesser eines Atoms. Fährt man die Spitze zeilenweise über die Oberfläche und hält den Strom konstant, zeichnet sie die Oberfläche Atom für Atom nach. Binnig und Rohrer erhielten dafür 1986 den Physik-Nobelpreis [8]. Mit Rastertunnelmikroskopen kann man inzwischen nicht nur Atome sehen, sondern auch einzeln verschieben.

Im USB-Stick und in der Tunneldiode

Jeder Flash-Speicher, ob im Smartphone, im USB-Stick oder in der SSD, nutzt den Tunneleffekt. Jede Speicherzelle hat eine kleine Insel, die elektrische Ladung festhalten kann und rundum von einer dünnen Isolierschicht umgeben ist. Legt man eine hohe Spannung an, tunneln Elektronen durch die Isolierschicht auf die Insel und bleiben dort gefangen, auch wenn der Strom längst abgeschaltet ist. Die Ladung auf der Insel steht für eine gespeicherte Eins oder Null. Der Mechanismus heißt nach seinen Entdeckern Fowler-

Nordheim-Tunneln, die ihn 1928 für Elektronen beschrieben, die in starken elektrischen Feldern aus Metallen austreten [9]. Dass Flash-Speicher nach sehr vielen Schreibvorgängen verschleißen, hat übrigens auch hier seinen Grund: Die ständig durchtunnelnden Elektronen beschädigen nach und nach die Isolierschicht.

Schon 1957 hatte Leo Esaki bei Sony entdeckt, dass in sehr stark dotierten Halbleiterdioden ein Tunnelstrom fließt, der in einem bestimmten Spannungsbereich sogar abnimmt, wenn die Spannung steigt [10]. Diese Tunneldiode war das erste elektronische Bauteil, das unmittelbar auf einem Quanteneffekt beruhte. Esaki teilte sich 1973 den Nobelpreis mit Ivar Giaever, der das Tunneln in Supraleitern untersucht hatte, und Brian Josephson, der vorhergesagt hatte, dass sogar Paare supraleitender Elektronen durch eine dünne Barriere tunneln können [11].

Tunneln, das man fast anfassen kann

Lange galt der Tunneleffekt als etwas, das nur einzelne Teilchen betrifft. 1984 und 1985 zeigten John Clarke, Michel Devoret und John Martinis in Berkeley, dass auch ein ganzer elektrischer Schaltkreis tunneln kann, ein supraleitender Kontakt, durch den Milliarden von Elektronen gemeinsam fließen [12]. Der Zustand des ganzen Stromkreises tunnelte als Einheit aus einem Zustand ohne Spannung heraus, und die Energie des Systems kam, wie bei einem Atom, nur in festen Stufen vor. Für diese Experimente bekamen die drei 2025 den Physik-Nobelpreis [13]. Auf solchen Schaltkreisen beruhen die supraleitenden Qubits, aus denen viele heutige Quantencomputer bestehen. Wie sie gebaut sind, beschreibt unser Artikel über supraleitende Qubits.

Eine Frage ist übrigens noch nicht befriedigend geklärt: Wie lange braucht ein Teilchen eigentlich, um durch die Barriere zu kommen? Darüber wird seit Jahrzehnten gestritten, weil sich der Begriff „Aufenthaltszeit“ für ein Quantenobjekt gar nicht so leicht festlegen lässt. Eine Gruppe in Toronto hat 2020 an ultrakalten Rubidiumatomen gemessen, wie lange sie sich im Mittel innerhalb einer Barriere aus Laserlicht aufhalten, und kam auf knapp eine Millisekunde [14]. Das ist ein wichtiger Messwert, aber noch nicht das Ende der Debatte.

Zum Weiterlesen

Quantum Computing verstehen

Matthias Homeister · Springer Vieweg, 2022 · ISBN 978-3-658-36433-5

Wer nach dem Abschnitt über den Nobelpreis 2025 wissen will, wie man mit tunnelnden Schaltkreisen rechnet, findet hier eine verständliche Einführung in Quantencomputer.

Bei Amazon ansehen*

Experimentalphysik 3: Atome, Moleküle und Festkörper

Wolfgang Demtröder · Springer, 2016 · ISBN 978-3-662-49093-8

Das Lehrbuch mit der Rechnung zum Tunneleffekt, zum Alphazerfall und zum Rastertunnelmikroskop, für Studium und Leistungskurs.

Bei Amazon ansehen*

* Werbelink: Kaufen Sie über diesen Link, erhalten wir von Amazon eine kleine Provision, am Preis ändert sich für Sie nichts. Mehr Empfehlungen auf unserer Seite Bücher zur Quantenphysik.

Quellen

1. NASA Goddard Space Flight Center: *Sun Fact Sheet.* nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/sunfact.html.
2. H. Geiger, J. M. Nuttall: *The ranges of the α particles from various radioactive substances and a relation between range and period of transformation.* In: Philosophical Magazine 22 (1911), S. 613–621, doi:10.1080/14786441008637156.
3. F. G. Kondev, M. Wang, W. J. Huang, S. Naimi, G. Audi: *The NUBASE2020 evaluation of nuclear physics properties.* In: Chinese Physics C 45 (2021), 030001, doi:10.1088/1674-1137/abddae.
4. G. Gamow: *Zur Quantentheorie des Atomkernes.* In: Zeitschrift für Physik 51 (1928), S. 204–212, doi:10.1007/BF01343196.
5. R. W. Gurney, E. U. Condon: *Wave Mechanics and Radioactive Disintegration.* In: Nature 122 (1928), S. 439, doi:10.1038/122439a0.

6. R. d'E. Atkinson, F. G. Houtermans: *Zur Frage der Aufbaumöglichkeit der Elemente in Sternen.* In: Zeitschrift für Physik 54 (1929), S. 656–665, doi:10.1007/BF01341595.
7. G. Binnig, H. Rohrer, Ch. Gerber, E. Weibel: *Surface Studies by Scanning Tunneling Microscopy.* In: Physical Review Letters 49 (1982), S. 57–61, doi:10.1103/PhysRevLett.49.57.
8. Nobel Prize Outreach: *The Nobel Prize in Physics 1986.* nobelprize.org/prizes/physics/1986/summary.
9. R. H. Fowler, L. Nordheim: *Electron Emission in Intense Electric Fields.* In: Proceedings of the Royal Society of London A 119 (1928), S. 173–181, doi:10.1098/rspa.1928.0091.
10. L. Esaki: *New Phenomenon in Narrow Germanium p–n Junctions.* In: Physical Review 109 (1958), S. 603–604, doi:10.1103/PhysRev.109.603.
11. Nobel Prize Outreach: *The Nobel Prize in Physics 1973.* nobelprize.org/prizes/physics/1973/summary.
12. M. H. Devoret, J. M. Martinis, J. Clarke: *Measurements of Macroscopic Quantum Tunneling out of the Zero-Voltage State of a Current-Biased Josephson Junction.* In: Physical Review Letters 55 (1985), S. 1908–1911, doi:10.1103/PhysRevLett.55.1908.
13. Nobel Prize Outreach: *The Nobel Prize in Physics 2025.* nobelprize.org/prizes/physics/2025/summary.
14. R. Ramos, D. Spierings, I. Racicot, A. M. Steinberg: *Measurement of the time spent by a tunnelling atom within the barrier region.* In: Nature 583 (2020), S. 529–532, doi:10.1038/s41586-020-2490-7.

Zitiervorschlag

quanten.de: *Der Tunneleffekt.* Stand: Oktober 2026. URL: https://quanten.de/tunneleffekt.html (PDF: https://quanten.de/pdf/tunneleffekt.pdf)

Texte und Abbildungen © 2026 quanten.de. Nutzung mit Quellenangabe und Link gern, kommerzielle Nutzung nach Absprache: info@quanten.de

Weiterlesen: Welle-Teilchen-Dualismus · Supraleitende Qubits · Die Unschärferelation · Fragen & Antworten