Quantenfluktuation: warum das Vakuum nicht leer ist

DAS QUANTENVAKUUM

Wolfgang Pauli soll einmal ausgerechnet haben, was passieren würde, wenn die Energie, die nach der Quantentheorie selbst im leeren Raum steckt, ganz normal Schwerkraft ausüben würde. So erzählten es später seine Assistenten. Das Ergebnis war absurd: Der Radius des Universums würde dann „nicht einmal bis zum Mond“ reichen. Pauli bestritt, dass es diese Energie im leeren Raum wirklich gibt [1].

Heute weiß man, dass der leere Raum tatsächlich nicht leer ist. Zwischen zwei Metallplatten im Vakuum wirkt eine messbare Kraft, Atome spüren das Vakuum in ihren Energieniveaus, und es lässt sich sogar Licht aus dem Nichts erzeugen. Paulis Problem aber ist geblieben: Zwischen der Rechnung und der Beobachtung klafft eine Lücke von etwa 120 Zehnerpotenzen [2].

Was ist ein Vakuum?

Im Alltag heißt Vakuum: Da ist nichts, keine Luft, keine Teilchen. In der Quantenphysik reicht das nicht. Auch wenn man jedes Atom und jedes Lichtteilchen entfernt, bleiben die Felder übrig, das elektromagnetische Feld zum Beispiel, das überall im Raum existiert. Der Artikel über die Quantenfeldtheorie erklärt, warum die Physik alle Teilchen als Anregungen solcher Felder beschreibt. Das Vakuum ist der Zustand, in dem die Felder die geringstmögliche Energie haben. Diese Energie ist aber nicht null.

Nullpunktenergie

Der Grund dafür steckt schon im einfachsten Quantensystem, einem schwingenden Teilchen, dem harmonischen Oszillator. Seine Energie kann nur bestimmte Werte annehmen:

$$E_n = (n + \frac{1}{2}) \cdot hf, \qquad n = 0, 1, 2, \ \ldots \tag{1}$$

Dabei ist h das Plancksche Wirkungsquantum und f die Frequenz der Schwingung. Selbst im untersten Zustand, bei $n = 0$, bleibt die Energie $\frac{1}{2} hf$ übrig. Max Planck stieß 1911 in seiner

sogenannten zweiten Quantentheorie als Erster auf diese Restenergie, die ein Oszillator selbst am absoluten Nullpunkt der Temperatur nicht abgeben kann [1],[3]. Daher der Name Nullpunktenergie.

Anschaulich hängt das mit der Unschärferelation zusammen. Ein Teilchen, das völlig ruhig an einer genau bestimmten Stelle sitzt, hätte zugleich einen exakten Ort und einen exakten Impuls, und das verbietet die Quantenmechanik. Ein Rest von Zittern bleibt immer [2]. Dass dieses Zittern echte Folgen hat, zeigt Helium. Es lässt sich selbst nahe dem absoluten Nullpunkt nur schwer zu einem Festkörper machen. Schon 1923 vermuteten Kurt Bennewitz und Franz Simon, dass dahinter die Nullpunktenergie der Heliumatome steckt, und sie lagen richtig [1].

Quantenfluktuationen und virtuelle Teilchen

Ein Feld kann man sich wie eine riesige Zahl solcher Oszillatoren vorstellen, einen für jede mögliche Schwingung. Jeder trägt seine Nullpunktenergie bei. Weil die Felder im Grundzustand nicht stillstehen können, spricht man von Quantenfluktuationen oder Vakuumfluktuationen: Die Feldstärke an einem Ort hat keinen festen Wert, sondern schwankt um null.

Oft hört man, im Vakuum entstünden ständig Paare von Teilchen und Antiteilchen, die gleich wieder verschwinden. Das ist ein Bild, das aus den Rechnungen stammt. In den Diagrammen, die Richard Feynman Ende der 1940er-Jahre einführte, tauchen solche virtuellen Teilchen als innere Linien auf. Sie lassen sich mit keinem Detektor auffangen und halten sich nicht an die Regeln, die für echte Teilchen gelten. Ob es sie wirklich gibt oder ob sie nur ein Rechenhilfsmittel sind, ist unter Physikern und Philosophen seit Jahrzehnten umstritten [4]. Mehr über die Diagramme steht im Porträt Richard Feynman.

Der Casimir-Effekt

Die bekannteste messbare Folge sagte der niederländische Physiker Hendrik Casimir 1948 voraus. Zwei ungeladene, perfekt leitende Platten, die sich im Vakuum dicht gegenüberstehen, ziehen sich an [5]. Der Grund: Zwischen den Platten passen nur Schwingungen, deren halbe Wellenlänge ganzzahlig in den Spalt passt. Außen sind alle Wellenlängen erlaubt. Von außen drückt also mehr Vakuumenergie auf die Platten als von innen [6] (Abb. 1).

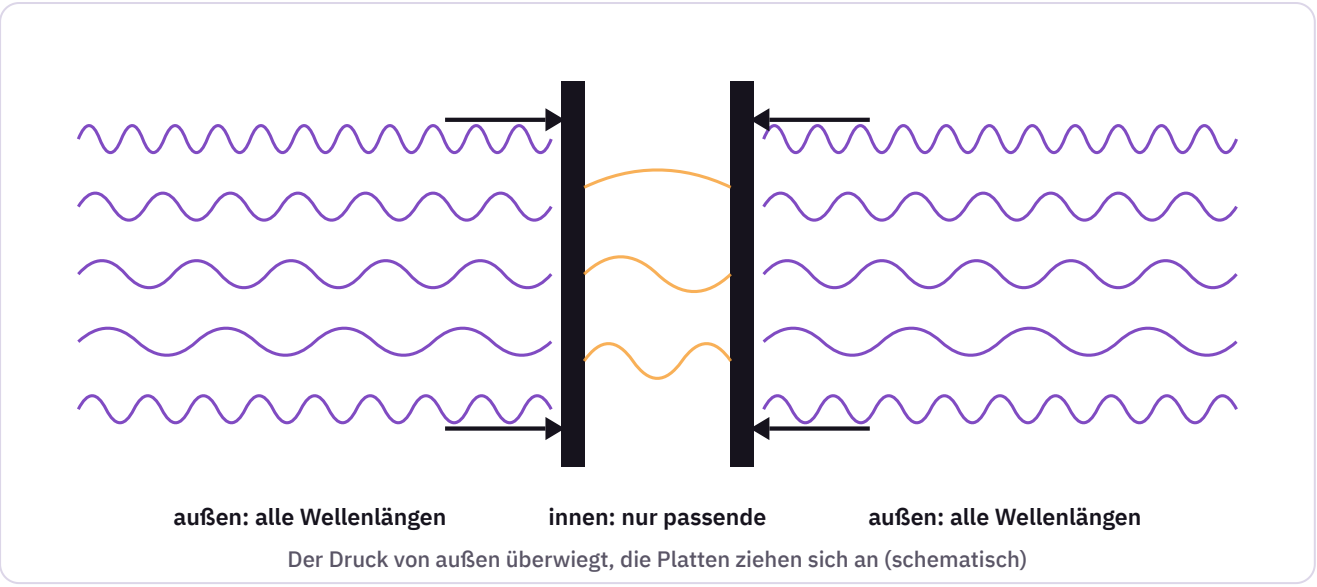


Abb. 1: Zwischen zwei Platten passen nur Schwingungen, deren halbe Wellenlänge ganzzahlig in den Spalt passt. Außen sind alle erlaubt. Dadurch drücken die Vakuumschwingungen von außen stärker als von innen. Eigene Darstellung nach [6],[5].

Für den Druck, mit dem die Platten zusammengedrückt werden, fand Casimir eine einfache Formel [5]:

$$\frac{F}{A} = \frac{\pi^2 \cdot \hbar \cdot c}{240 \cdot d^4} \tag{2}$$

Hier ist $\hbar$ das reduzierte Wirkungsquantum, c die Lichtgeschwindigkeit und d der Abstand der Platten. Weil d in der vierten Potenz im Nenner steht, ist die Kraft nur bei winzigen Abständen spürbar. Bei einem Mikrometer Abstand beträgt der Druck etwa ein Tausendstel Pascal, bei zehn Nanometern dagegen gut ein Bar, also etwa so viel wie der Luftdruck (eigene Rechnung).

Gemessen wurde der Effekt erst Jahrzehnte später. Steve Lamoreaux gelang das 1997 in Los Alamos mit einer Torsionswaage, auf 5 Prozent genau [7]. Ein Jahr später erreichten Umar Mohideen und Anushree Roy mit einem Rasterkraftmikroskop, einer Kugel und einer Platte beim kleinsten Abstand eine Abweichung von nur einem Prozent zur Theorie [8]. Die schwierigste Variante mit zwei echten parallelen Platten, wie Casimir sie sich gedacht hatte, schafften Giacomo Bressi und Kollegen 2002 auf 15 Prozent genau [9].

Licht aus dem Nichts

Wenn ruhende Spiegel das Vakuum verändern, was passiert dann mit einem Spiegel, der sich sehr schnell bewegt? Er sollte echte Lichtteilchen aus den Vakuumfluktuationen erzeugen. Einen echten Spiegel kann man dafür aber nicht schnell genug hin und her bewegen. Eine Gruppe an der Chalmers University in Schweden baute 2011 deshalb einen elektrischen Ersatz, einen supraleitenden Schaltkreis, der wie ein Spiegel für Mikrowellen wirkt und dessen wirksame Lage

sich milliardenfach pro Sekunde verschieben lässt, mit bis zu einem Viertel der Lichtgeschwindigkeit [10]. Tatsächlich entstanden Photonen, immer paarweise, so wie es die Theorie für diesen dynamischen Casimir-Effekt vorhersagt [11],[10].

Die Lamb-Verschiebung

Auch Atome spüren das Vakuum. 1947 maßen Willis Lamb und Robert Retherford mit Mikrowellen, dass zwei Energieniveaus im Wasserstoffatom, die nach der damaligen Theorie genau gleich sein sollten, ein klein wenig auseinanderliegen [12]. Noch im selben Jahr erklärte Hans Bethe die Verschiebung damit, dass das Elektron mit dem elektromagnetischen Feld wechselwirkt, auch wenn gar kein Licht vorhanden ist [13]. Lamb erhielt für diese Entdeckungen 1955 den Physik-Nobelpreis [14]. Die Rechnung war ein wichtiger Schritt zur Quantenelektrodynamik.

Vakuumenergie und das Rätsel der Kosmologie

Dass die Nullpunktenergie des leeren Raums für das ganze Universum wichtig sein könnte, schlug als Erster der physikalische Chemiker Walther Nernst 1916 vor [1]. Ernst genommen wurde das lange nicht. Das änderte sich, als zwei Forscherteams an fernen Supernovae entdeckten, dass sich das Universum immer schneller ausdehnt, wofür Saul Perlmutter, Brian Schmidt und Adam Riess 2011 den Nobelpreis erhielten [15]. Die einfachste Erklärung ist eine Energie, die im leeren Raum selbst steckt, in der Sprache der Relativitätstheorie eine kosmologische Konstante [16].

Das Problem ist ihre Größe. Rechnet man die Nullpunktenergien aller Felder zusammen, kommt ein Wert heraus, der etwa 120 Zehnerpotenzen über dem beobachteten liegt [2]. Steven Weinberg nannte das 1989 das Problem der kosmologischen Konstante und beschrieb fünf Lösungsansätze [16]. Einer davon ist das anthropische Argument, das im Artikel über das Multiversum beschrieben ist. Eine allgemein akzeptierte Lösung gibt es nicht [2].

Eine andere Wirkung der Fluktuationen ist dagegen gut belegt. Nach der Theorie der kosmischen Inflation wurden winzige Quantenfluktuationen im jungen Universum zu Dichteschwankungen aufgebläht, aus denen später Galaxien entstanden. Die Messungen des Satelliten Planck stimmen gut mit den einfachsten Modellen dieser Theorie überein [17]. Mehr dazu im Artikel über den Urknall.

Freie Energie aus dem Vakuum?

Immer wieder wird behauptet, man könne die Nullpunktenergie mit einem Gerät anzapfen und so unbegrenzt Strom gewinnen. Das funktioniert nicht. Das Vakuum ist schon der Zustand mit der niedrigsten Energie, die es gibt. Um Arbeit zu verrichten, muss Energie von einem höheren in einen

niedrigeren Zustand fließen, und unter dem Vakuum gibt es nichts mehr. Der Kosmologe Paul Sutter vergleicht das mit einem Haus ohne Keller, in dem man nicht tiefer als ins Erdgeschoss kommt [18]. Auch der Casimir-Effekt ist keine Energiequelle. Wer die Platten zusammenschnappen lässt, gewinnt einmal ein bisschen Energie, muss aber mindestens genauso viel hineinstecken, um sie wieder auseinanderzuziehen. Ähnliche Versprechen begegnen einem bei der Quantenheilung.

Pauli hatte recht, dass mit der Vakuumenergie etwas nicht stimmt, und unrecht, dass es sie nicht gibt. Die Kraft zwischen den Platten ist gemessen, das Licht aus dem Nichts auch. Warum das Universum trotzdem viel weiter reicht als bis zum Mond, kann bis heute niemand erklären.

Quellen

1. H. Kragh: *Preludes to dark energy: zero-point energy and vacuum speculations.* In: Archive for History of Exact Sciences 66 (2012), S. 199–240, doi:10.1007/s00407-011-0092-3; Preprint arXiv:1111.4623.
2. R. J. Adler, B. Casey, O. C. Jacob: *Vacuum catastrophe: An elementary exposition of the cosmological constant problem.* In: American Journal of Physics 63 (1995), S. 620–626, doi:10.1119/1.17850.
3. M. Planck: *Über die Begründung des Gesetzes der schwarzen Strahlung.* In: Annalen der Physik 342 (1912), S. 642–656, doi:10.1002/andp.19123420403.
4. J.-P. Martinez: *The Curious Concept That Almost Nobody Seemed to Care About at First: Virtual Particles in the Post-War Period.* In: Berichte zur Wissenschaftsgeschichte 48 (2025), S. 143–162, doi:10.1002/bewi.202400023.
5. H. B. G. Casimir: *On the attraction between two perfectly conducting plates.* In: Proceedings of the Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen 51 (1948), S. 793–795; Faksimile des Nachdrucks der Akademie von 1997 bei der TU München.
6. Spektrum der Wissenschaft: *Die Kraft aus dem Nichts.* 30. November 1998, spektrum.de.
7. S. K. Lamoreaux: *Demonstration of the Casimir Force in the 0.6 to 6 μm Range.* In: Physical Review Letters 78 (1997), S. 5–8, doi:10.1103/PhysRevLett.78.5.
8. U. Mohideen, A. Roy: *Precision Measurement of the Casimir Force from 0.1 to 0.9 μm.* In: Physical Review Letters 81 (1998), S. 4549–4552, doi:10.1103/PhysRevLett.81.4549.
9. G. Bressi, G. Carugno, R. Onofrio, G. Ruoso: *Measurement of the Casimir Force between Parallel Metallic Surfaces.* In: Physical Review Letters 88 (2002), 041804, doi:10.1103/PhysRevLett.88.041804.
10. Swedish Research Council: *Scientists create light from vacuum.* Pressemitteilung über die Arbeit an der Chalmers University of Technology, ScienceDaily, 19. November 2011, sciencedaily.com.
11. C. M. Wilson, G. Johansson, A. Pourkabirian u. a.: *Observation of the dynamical Casimir effect in a superconducting circuit.* In: Nature 479 (2011), S. 376–379, doi:10.1038/nature10561.
12. W. E. Lamb, R. C. Retherford: *Fine Structure of the Hydrogen Atom by a Microwave Method.* In: Physical Review 72 (1947), S. 241–243, doi:10.1103/PhysRev.72.241.
13. H. A. Bethe: *The Electromagnetic Shift of Energy Levels.* In: Physical Review 72 (1947), S. 339–341, doi:10.1103/PhysRev.72.339.
14. Nobel Prize Outreach: *The Nobel Prize in Physics 1955.* nobelprize.org.
15. Nobel Prize Outreach: *The Nobel Prize in Physics 2011.* nobelprize.org.

16. S. Weinberg: *The cosmological constant problem.* In: Reviews of Modern Physics 61 (1989), S. 1–23, doi:10.1103/RevModPhys.61.1.
17. Planck Collaboration, Y. Akrami u. a.: *Planck 2018 results. X. Constraints on inflation.* In: Astronomy & Astrophysics 641 (2020), A10, doi:10.1051/0004-6361/201833887.
18. P. M. Sutter: *There's an infinite amount of energy locked in the vacuum of space-time. Could we ever use it?* Space.com, 9. Juni 2025, space.com.

Zitiervorschlag

quanten.de: *Quantenfluktuation: warum das Vakuum nicht leer ist.* Stand: November 2026. URL: https://quanten.de/quantenfluktuation.html

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

Weiterlesen: Quantenfeldtheorie · Unschärferelation · Multiversum · Richard Feynman