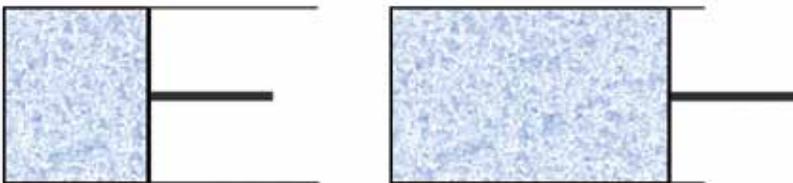


so erhalten wir Newton pro Quadratmeter. Das entspricht wiederum einer Kraft pro Fläche, also einem Druck. Energiedichte und Druck sind somit dasselbe. Ein ausgequetschtes Nichts mit negativer Energie pro Volumen übt also einen negativen Druck aus.

Gaßner: Ich fürchte, das ist alles sehr schwer zu verstehen. Kehren wir nochmals zurück zu unserem Gedankenexperiment und erzeugen wiederum ein Nichts in einem abgeschlossenen Raum – nennen wir es besser ein quantenmechanisches Vakuum, um der Erkenntnis Rechnung zu tragen, dass es mit Quantenfluktuationen angefüllt ist. Denken wir uns eine Wand des Behälters beweglich, wie bei einem Kolben. Dadurch können wir das quantenmechanische Nichts vergrößern, beispielsweise auf das doppelte Volumen. Lokal betrachtet ändert sich auch dann das Verhalten in unserem Behälter nicht. Quantenfluktuationen lassen sich insbesondere nicht verdünnen, ganz im Gegensatz zu Gasen. Die Expansion des Raumes vergrößert lediglich die „Spielwiese“ für Quantenfluktuationen. Neue Teilchen-Antiteilchen-Paare füllen den zusätzlichen Raum aus. Ein Gas würde sich durch die Expansion abkühlen, der Druck beziehungsweise die Energie pro Volumen würde abnehmen. In unserem quantenmechanischen Vakuum bleiben diese Werte jedoch konstant. Ein doppeltes Volumen enthält die doppelte Energie. Die Expansion um den Faktor zwei hat unser ursprüngliches Nichts gewissermaßen dupliziert. Dies ist nicht weiter tragisch, solange seine Energie um den Nullpunkt schwankt: Zweimal null gibt wieder null.



2.7 Quantenfluktuationen (blau) lassen sich durch Expansion nicht verdünnen, weil sich im zusätzlichen Volumen instantan neue Teilchen-Antiteilchen-Paare bilden.

- Lesch: Aber was passiert, wenn sich das quantenmechanische Nichts – warum auch immer – in einem falschen Zustand mit positiver Energie befindet?
- Gaßner: Dann hätte unsere Kolbenbewegung diese Energie verdoppelt. Selbstverständlich kann Energie nicht einfach entstehen. Um den Kolben herauszuziehen, mussten wir exakt die Energie aufwenden, die im Inneren hinzugewonnen wurde. Mit anderen Worten: Das quantenmechanische Vakuum hat unserer Expansion eine Kraft entgegengesetzt, es übt also einen „Sog“, einen negativen Druck auf den Kolben aus. Schlimmer noch: Dieser negative Druck bleibt konstant, völlig unbeeindruckt von der Expansion. Dies ist ein richtiger Knaller unter den Eigenschaften des Nichts und das im doppelten Sinne: der „Ur-Knaller!“ Seit Einstein wissen wir nämlich, dass nicht nur Masse, sondern gemäß $E = m c^2$ auch Energie gravitativ wirkt. Somit lässt sich auch einem Druck – wir haben ja gesehen, dass er gleichbedeutend ist mit einer Energiedichte – gravitativ eine Masse pro Volumen zuordnen. Vielleicht wird es durch ein Gedankenexperiment anschaulicher: Wenn ich zwei identische Spiralfedern in meinen Händen hielte, eine davon entspannt und eine zusammengedrückt. Welche wäre schwerer?
- Lesch: Die zusammengedrückte Feder wäre ein bisschen schwerer, weil sie über zusätzliche Energie verfügt – eben die Energie, die ich aufwenden müsste, um die entspannte Feder zusammenzudrücken.
- Gaßner: Klar, du bist theoretischer Physiker, für dich ist das einfach. Erfahrungsgemäß ist das aber ein kniffliger Gedankengang. Noch kniffliger ist der Umkehrschluss: Ein negativer Druck entspricht einer negativen Energie pro Volumen, vergleichbar einer negativen Masse pro Volumen, und verringert somit den Betrag der anziehenden Masse in einem Volumen, d. h. er wirkt antigravitativ. Ist der negative Druck groß genug, kann er das Tauziehen aus Anziehung und Abstoßung für sich entscheiden und das Universum expandieren.
- Lesch: Hier haben wir es also mit einer antigravitativen Energiefreisetzung aus dem Vakuum zu tun, die selbst unter extremster Expansion des Raumes nicht abgeschwächt wird. Ich vermute, darauf werden wir bei der Suche nach dem „Knall“ des Urknalls noch einmal zurückkommen.

Gaßner: Ja, ja, liebe Leserinnen und Leser. Ich ahne schon, wie Sie zweifeln: Das Nichts übt einen negativen Druck aus? Sie hätten gerne Beweise? Bitte-schön: Hendrik Casimir hat bereits 1948 einen Versuchsaufbau beschrieben, in dem sich zwei parallele, leitende Platten im Vakuum gegenseitig stärker anziehen, als es die Gravitation allein erklären könnte (Abbildung 2.9). Dieser negative Druck zwischen den Platten entsteht, weil elektromagnetische Wellen nicht in leitende Medien eindringen können. Die möglichen Quantenfluktuationen zwischen den Platten sind somit in Form und Anzahl beschränkt. Außerhalb unterliegen die Quantenfluktuationen nicht dieser Einschränkung, dort existieren mehr Möglichkeiten. Die zahlenmäßige Überlegenheit der äußeren Fluktuationen übt einen Druck auf die Platten aus. Dank stark verbesserter Messgeräte konnte dieser *Möglichkeitsdruck* mittlerweile mit hoher Genauigkeit bestätigt werden. Bei Platten in der Größe einer Handfläche entspricht der negative Druck bei einem Abstand von einem zehntausendstel Zentimeter etwa dem Gewicht eines Wassertropfens. Dieser Effekt ist sogar von praktischer Bedeutung. Er setzt der immer weiter fortschreitenden Miniaturisierung von Maschinen eine theoretische Grenze, ab der bewegliche Teile miteinander verkleben.

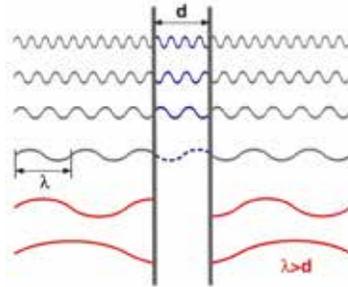
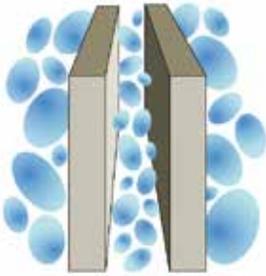


2.8 Hendrik Casimir
(1909 - 2000)

Lesch: Zwischen den leitenden Platten sind trotz der Begrenzung unendlich viele Quantenfluktuationen möglich. Aber wie können außen mehr als unendlich viele sein?

Gaßner: In beiden Fällen sind es unendlich viele. Trotzdem sind es außen mehr als innen. Ein Beispiel: Es gibt unendlich viele ganze Zahlen, $-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3$ usw. Ebenso gibt es unendlich viele Zahlen mit Nachkommastellen. Nimmt man auch noch solche hinzu, die sich nicht als Brüche darstellen lassen, so erhält man wiederum unendlich viele, allerdings mehr als es ganze Zahlen gibt.

Lesch: Puh! Das ist schon ein hartes Stück: Unendlich ist mehr als unendlich, Quantenfluktuationen, die einen Sog ausüben, antigravitative Energie-freisetzung aus dem Vakuum!



2.9 Erzeugt man in einem Vakuum künstliche Randbedingungen, z. B. durch zwei leitende, parallele Platten, dann unterliegen die Quantenfluktuationen zwischen den Platten Einschränkungen, die es außerhalb nicht gibt. Offensichtlich wird dies, wenn man die Fluktuationen als Wellen darstellt (rechtes Bild). Zwischen den Platten finden nur Wellenlängen λ Platz, die ganzzahlig im Abstand d enthalten sind (blau), weil die Wellen an einer leitenden Oberfläche immer bei null beginnen und bei null enden. In der Folge sind zwischen den Platten weniger Quantenfluktuationen möglich als außerhalb und dieser Möglichkeitsdruck ist messbar – er steigt mit $1/d^4$.

Gaßner: Wem der Möglichkeitsdruck zu abgedreht erscheint, der kann alternativ über die Energie argumentieren. Je näher die Platten beieinander sind, um so weniger Fluktuationen haben zwischen ihnen Platz. Das verringert die Nullpunkt-Energie. Diese Energiedifferenz wird in Form von Bewegungsenergie auf die Platten übertragen. Das erzeugt den negativen Druck und schon bist du wieder bei der Antigravitation.

Lesch: Wirklich einfacher wird es dadurch aber auch nicht. Außerdem werden die Platten doch zusammengedrückt, wie soll das eine Expansion beweisen?

Gaßner: Der *Casimir-Effekt* beweist erst mal nur, dass es überhaupt einen negativen Druck gibt und dass er durch Quantenfluktuationen erklärt werden kann. Dafür teilt man das Vakuum, mithilfe der leitenden Platten, in einen Bereich mit höherer (außerhalb) und einen mit niedrigerer Vakuumenergie (zwischen den Platten). Dieser Druckunterschied bewegt die Platten aufeinander zu, so wie Wolken vom Hochdruck- ins Tiefdruckgebiet wandern. Die Expansion, auf die wir hinauswollen, vollzieht sich jedoch im Vakuum – ohne irgendwelche Platten und ohne ein Druckgefälle. Egal ob positiv oder negativ und egal wie hoch der Druck absolut ist, solange er überall

gleich ist, bewegt er rein mechanisch erst mal nichts. Aber nochmal, weil es für das Verständnis entscheidend ist: Druck entspricht einer Energiedichte und Energie wirkt gravitativ: positive Energie gravitativ anziehend, negative Energie gravitativ abstoßend. Einzig diese anti-gravitativ Wirkung des negativen Drucks treibt die Expansion an.

Lesch: Es ist schon beruhigend, dass es experimentelle Beweise für die Eigenschaften des Vakuums gibt und es sich nicht um rein theoretische Überlegungen handelt.

Gaßner: Experiment und Berechnung sind das einzig Entscheidende in der Quantenmechanik. Es gibt ja diesen berühmten Satz unter Quantenmechanikern: „Shut up and calculate“. Das soll so viel heißen wie: „Zeig mir einfach, was du ausgerechnet hast und versuch gar nicht erst, mir etwas mit Worten plausibel zu machen.“ Sobald man versucht, mit Anschauung an die Sache heranzugehen, muss man zwangsläufig scheitern, weil die Quantenmechanik eben nicht anschaulich ist.

Lesch: Josef, weißt du, woran man erkennt, dass sich eine Gesprächsrunde mit Quantenmechanik beschäftigt hat? Nachdem die Leute stundenlang diskutiert haben, verlassen alle kopfschüttelnd den Raum.

Gaßner: Alles schwankt eben, selbst die Köpfe derer, die sich damit beschäftigen.

Lesch: Sogar die Altvorderen sind an der Anschauung gescheitert. Erwin Schrödinger soll mal gesagt haben: „Wenn es bei dieser verdammten Quantenspringerei bleiben soll, so bedaure ich, mich mit der Quantentheorie überhaupt befasst zu haben.“

Gaßner: Legendar ist das Zitat von Albert Einstein, das man heute gerne in der Version: „Gott würfeln nicht“ findet. Tatsächlich war er weniger zurückhaltend: „Die Quantenmechanik ist sehr achtungsgebietend. Aber eine innere Stimme sagt mir, dass das noch nicht der wahre Jakob ist. Die Theorie liefert viel, aber dem Geheimnis des Alten (Gott) bringt sie uns kaum näher. Jedenfalls bin ich überzeugt, dass der Alte nicht würfeln.“



2.10 Erwin Schrödinger
(1887 - 1961)

- Lesch: Das macht es so schwierig. Wenn man sich überlegt, dass wir den Anfang des Universums beschreiben müssen mit Schwankungen von etwas, das sich nicht fassen lässt, dass – selbst wenn es nicht da ist – da immer noch was schwankt, das macht natürlich jede kosmologische Theorie der Moderne zu einem fast unverständlichen mathematischen Kunstwerk. Das einzige, woran man sich noch festhalten kann, sind Experimente. In diesen Experimenten hat man genau die Effekte gefunden, die man möglicherweise bräuchte, um das Universum in seinem Anfang zu verstehen. Ohne Experiment geht gar nichts!
- Gaßner: Experimente liefern uns das Geländer, an dem wir uns am Abgrund der wissenschaftlichen Erkenntnis gerade noch festhalten können.
- Lesch: Man könnte auch sagen: Jenseits von Gut und Böse bleibt immer noch das Geländer des Experiments. Das hätte Nietzsche gut gefallen.
- Gaßner: Das werden die Experimentalphysiker aber nicht gerne hören, dass Du sie jenseits von Gut und Böse ansiedelst. Für meine Begriffe ist das Geländer schon noch diesseits – gerade noch so. Allerdings dieses Schwanken, von dem du sprichst, das ist genau der Grund, warum es überhaupt einen Abgrund gibt, an dem wir stehen. Es ist doch prickelnd, darüber nachzudenken, warum es überhaupt eine Grenze der physikalischen Erkenntnis gibt. Man würde doch meinen: O. k., wenn wir irgendwas noch nicht so genau wissen, dann bauen wir eben ein größeres Gerät, ein besseres Instrument und messen die Stelle nach dem Komma. Dann wissen wir es etwas besser.
- Lesch: Ja, klingt doch gut und eingängig.
- Gaßner: Ist es aber nicht. An dieser Stelle lauert eine Klippe mit ihrer Kante. Und die entsteht, weil hier die Quantenmechanik Schwankungen postuliert und die Allgemeine Relativitätstheorie, die genauso universell gültig ist, diese Schwankungen nicht unterbringt. Hier stoßen eine quantisierte und eine kontinuierliche Theorie aufeinander. Normalerweise sind sie friedlich voneinander getrennt – die Quantenmechanik zuständig im Kleinsten, die Allgemeine Relativitätstheorie zuständig bei den größten Energien. Im Urknall haben wir etwas ganz Kleines und trotzdem eine unglaublich hohe Energie. Genau das ist die Kante!