

Was ist Nullpunktsenergie?



International
Space Federation

[International Space Federation](#)

[Nassim Hamein](#)

[Zum Originalartikel](#)

Letzte Aktualisierung am 06. Januar 2025



Die [Nullpunktsenergie](#) (NPE) zählt zu den faszinierendsten und tiefgreifendsten Entdeckungen der modernen Physik. Erstmals von [Max Planck](#) im frühen 20. Jahrhundert während seiner bahnbrechenden Arbeiten zur [Schwarzkörperstrahlung](#) identifiziert, zeigt die Nullpunktsenergie, dass [Quantensysteme](#) selbst bei [absoluter Nulltemperatur](#) eine fundamentale, nicht reduzierbare [Energienmenge](#) besitzen. Diese Entdeckung revolutionierte nicht nur unser Verständnis von der [Quantenmechanik](#), sondern stellte auch unsere grundlegendsten Annahmen über die Natur des leeren Raumes infrage. Dieser Artikel beleuchtet die bemerkenswerte Geschichte der Nullpunktsenergie – von ihrer unerwarteten Entdeckung während Plancks praktischer Arbeiten zur Optimierung von [Glühlampen](#) über ihre zentrale Rolle in der Quantenmechanik und [Feldtheorie](#) bis hin zu ihren modernen [Implikationen](#) für Themen wie die Stabilität von [Materie](#) oder die [Expansion des Universums](#). Wir werden untersuchen, wie sich die Nullpunktsenergie in beobachtbaren Phänomenen wie dem [Casimir-Effekt](#) und den [Quantenvakuumfluktuationen](#) zeigt, betrachten ihre Beziehung zur [Gravitation](#) und zur [Geometrie der Raumzeit](#) und werfen einen Blick auf mögliche technologische Anwendungen. Dabei begegnen wir einigen der größten Vertreter der [Physik](#) – darunter [Einstein](#), [Stern](#) und [Nernst](#) – und sehen, wie ihre Arbeiten unser Verständnis dieses fundamentalen Aspektes der Natur vertieft haben. Zudem beleuchten wir aktuelle Forschungen, die darauf hindeuten, dass die Nullpunktsenergie entscheidend sein könnte, um einige der hartnäckigsten Rätsel der Physik zu lösen – von der Herkunft der Masse bis zur Natur der Gravitation selbst. Ob Physiker, Student oder einfach nur neugierig auf die grundlegende Natur der Realität – diese Erkundung der Nullpunktsenergie bietet faszinierende Einblicke in die Quantenwelt, die unserer alltäglichen Erfahrung zugrunde liegt.

„Die Existenz einer Nullpunktsenergie der Größe $\frac{1}{2} h\nu$ [ist] wahrscheinlich.“ – Albert Einstein und Otto Stern (1913).^[1]

Die Reise zum Verständnis der Nullpunktsenergie begann im frühen 20. Jahrhundert, eng verknüpft mit der Entstehung der [Quantenphysik](#) selbst. Die Geschichte ihrer Entdeckung zeugt von der Kraft [wissenschaftlicher Forschung](#), die verborgenen Mechanismen des [Universums](#) aufzudecken, selbst wenn diese unsere grundlegendsten Annahmen über die [Realität](#) herausfordern. Um die Wende zum 19. Jahrhundert weckten neue [Technologien](#) wie die [Glühlampe](#) großes Interesse daran, wie [Materialien](#) mit [Strahlung](#) interagieren. Die Entwicklung [effizienter](#) Glühlampen erforderte ein Verständnis davon, wie Energie von materiellen Körpern, wie dem Glühfaden einer Lampe, [absorbiert](#) und [emittiert](#) wird. In den frühen 1890er-Jahren beauftragte die [Physikalisch-Technische Reichsanstalt](#) (PTR) den Physiker [Max Planck](#) (Abbildung 1) damit, Glühlampen effizienter zu gestalten, sodass sie bei minimalem Stromverbrauch eine maximale Lichtausbeute liefern. Wie wir sehen werden, begann die Geburt der [Quantentheorie](#) mit Plancks Arbeiten zur [Optimierung der Technik von Glühlampen des frühen 20. Jahrhunderts](#) – ein Ereignis, das sich als wegweisend für die moderne Wissenschaft und Physik erweisen sollte.

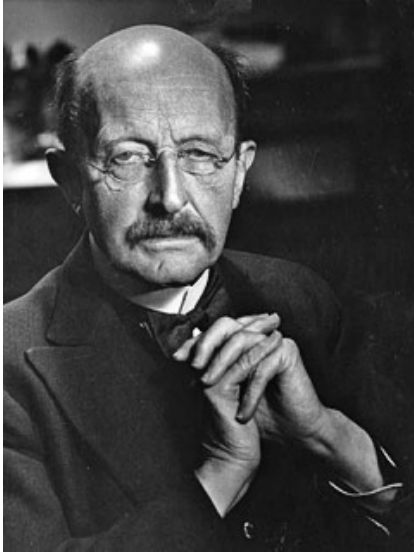


Abbildung 1. Max Planck, dessen Arbeiten zu den Eigenschaften der thermischen Absorption und Emission elektromagnetischer Strahlung durch erhitzte Materialien, wie den Glühfaden einer Glühlampe, zur Entdeckung der Nullpunktsenergie führten.

Planck wollte eine [Theorie](#) entwickeln, die die experimentellen Ergebnisse von [Gustav Kirchhoff](#) beschreiben konnte – einem [Physiker](#) und [Mathematiker](#), der grundlegende Theorien zu [elektrischen Schaltkreisen](#), zur [Spektroskopie](#) und der [Strahlungsemission durch erhitzte Objekte](#) entwickelte.^[2] Planck strebte an, Kirchhoffs Arbeiten zu erweitern, indem er die Wechselwirkung zwischen [elektromagnetischen Wellen](#) (Licht) und [Materie](#) (einem materiellen Körper) untersuchte, um die optimale [Temperatur](#) für Glühlampenfäden zu finden, welche die [Energieeffizienz](#) maximiert. Es war ein sehr pragmatisches Ziel: die [Effizienz](#) von Glühlampen zu steigern, indem die optimale Temperatur ermittelt wird, bei der die Fäden fast ausschließlich im [sichtbaren Lichtspektrum](#) strahlen, mit wenig bis keiner Emission [elektromagnetischer Energie](#) in den [ultravioletten](#) und [infraroten](#) Bereichen des Spektrums (Abbildung 2).

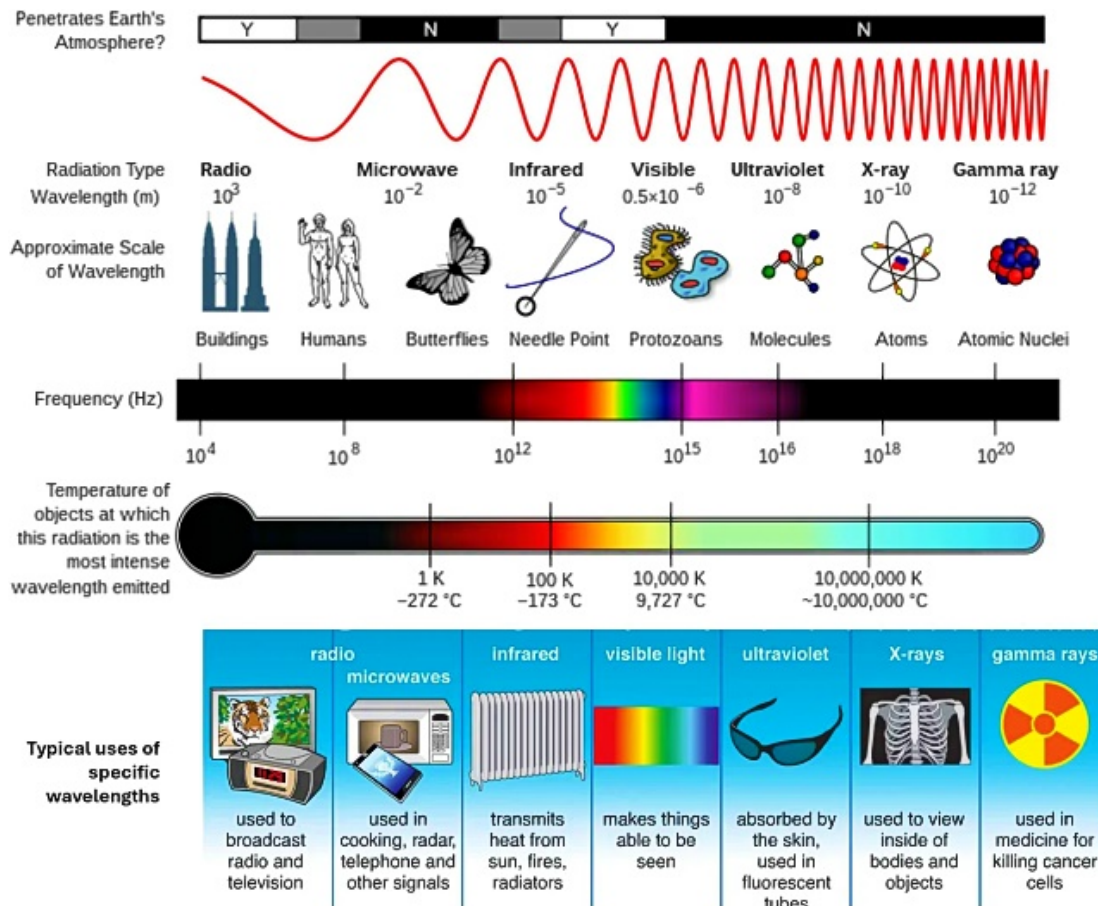


Abbildung 2. Das elektromagnetische Spektrum. Planck und die Physikalisch-Technische Reichsanstalt wollten die optimale Temperatur finden, bei der Glühlampen hauptsächlich im sichtbaren Spektrum strahlen und nicht in den benachbarten Wellenlängenbereichen des Infrarots (das Wärme überträgt) und des Ultraviolett (das unsichtbar ist und ionisierende Strahlung darstellt). Zu Plancks Zeit sagten die thermodynamischen Modelle der klassischen Physik voraus, dass bei hohen Temperaturen und kurzen Wellenlängen, wie im Ultraviolettbereich, unendlich viel Energie freigesetzt würde, was jedoch nicht mit den beobachteten Ergebnissen übereinstimmte.

Die Versuche von [Lord Rayleigh](#) und Sir [James Jeans](#), das Verhalten der Emissions- und Absorptionsfähigkeit erhitzter Materialien zu beschreiben, das Kirchhoff bei der Wechselwirkung von [Materie](#) mit [thermischer elektromagnetischer Strahlung](#) beobachtet hatte, führten zum [Rayleigh-Jeans-Gesetz](#), das Ergebnisse lieferte, die offensichtlich den Beobachtungen widersprachen, da dessen Formulierung vorhersagte, dass bei kurzen Wellenlängen im [ultravioletten Spektrum](#) unendlich viel Energie abgestrahlt würde. Dies führte zu dem, was als [Ultraviolett-Katastrophe](#) bekannt wurde. Da die Formulierung zudem häufig ein idealisiertes Material berücksichtigte, das alle [Wellenlängen](#) perfekt absorbiert, also schwarz erscheint, weil es keine Wellenlängen reflektiert, und daher als idealisierter [Schwarzer Körper](#) bezeichnet wurde (Abbildung 3), wurde diese Krise in der [Thermodynamik](#) und in der [klassischen Physik](#) auch als das Problem der [Schwarzkörperstrahlung](#) bezeichnet.

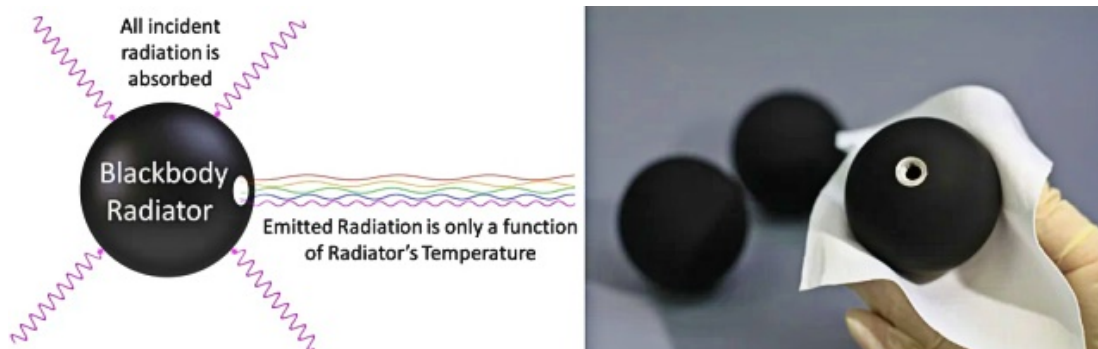


Abbildung 3. A) Eine schematische Darstellung der Art von Hohlraumstrahlern, die in Experimenten von Physikern wie Max Planck für thermodynamische Untersuchungen der Zusammenhänge zwischen Absorption, Temperatur und Strahlungsemission durch materielle Objekte verwendet wurden. B) Ein tatsächlicher „Schwarzkörper-Strahler“, der in Experimenten genutzt werden kann, um die Wellenlänge und Energie der elektromagnetischen Strahlung zu messen, die der Strahler bei Erwärmung auf bestimmte Temperaturen abgibt. Untersuchungen des frühen 20. Jahrhunderts mit solchen Schwarzkörper-Strahlern ermöglichten die Optimierung der Effizienz von Glühlampen und führten zur Entdeckung der Nullpunktsenergie.

Im Wesentlichen sagte die klassische Physik, insbesondere das Rayleigh-Jeans-Gesetz, voraus, dass die Intensität der Strahlung, die von einem Schwarzen Körper – einem idealisierten Material, das Energie in Form von Strahlung perfekt absorbiert und emittiert – abgegeben wird, unbegrenzt ansteigen würde, je höher die Frequenz ist (was einer kürzeren Wellenlänge entspricht), was zu einer unendlichen Menge an abgestrahlter Gesamtenergie führen würde. Um das Konzept eines Schwarzen Körpers zu verstehen, betrachten wir das einfache Beispiel des Tragens unterschiedlich gefärbter Kleidung: Ein schwarzes Hemd an einem sonnigen Tag absorbiert eine erhebliche Menge an elektromagnetischer Energie und wird heiß, während ein weißes Hemd nicht dieselbe Menge an Strahlung absorbiert (es reflektiert Wellenlängen und ist kein perfekter Absorber). Das schwarze Hemd in diesem Beispiel ähnelt dem idealisierten Schwarzen Körper, der thermodynamisch strahlt, wenn er heiß wird, und im Falle des Glühlampenfadens schließlich sichtbares Licht emittiert.

Diese Abweichung im Rayleigh-Jeans-Gesetz (eine Vorhersage unendlicher abgestrahlter Energie bei kurzen Wellenlängen) stand in direktem Widerspruch zu experimentellen Beobachtungen, da Materialien, wie die Glühlampenfäden, bei Erreichen hoher Temperaturen offensichtlich keine unendliche Energie abstrahlten (Abbildung 4) – dieses Problem wurde auch als die Rayleigh-Jeans-Divergenz bezeichnet.

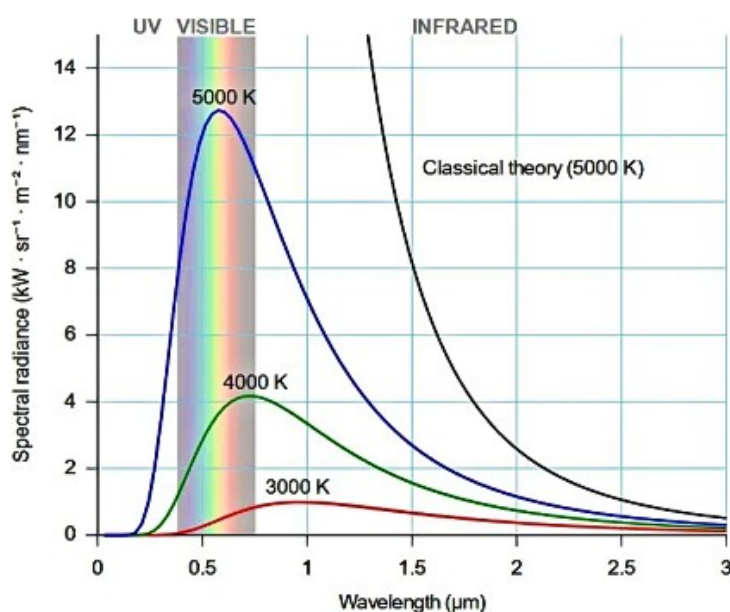


Abbildung 4. Die Ultraviolett-Katastrophe bezeichnet den Fehler bei kurzen Wellenlängen im Rayleigh-Jeans-Gesetz (im Diagramm als „klassische Theorie“ dargestellt) für die von einem Schwarzen Körper (einem idealisierten Material mit perfekter Absorption und Emission von Energie) abgegebene Energie. Der Fehler, der bei kurzen Wellenlängen besonders ausgeprägt ist, zeigt sich in der Abweichung zwischen der schwarzen Kurve (wie vom Rayleigh-Jeans-Gesetz klassisch vorhergesagt) und der blauen Kurve (der gemessenen Kurve, wie sie durch Plancks Gesetz vorhergesagt wird).

Plancks Lösung für dieses Rätsel war revolutionär. Im Jahr 1900 nahm er an, dass ein hypothetischer elektrisch geladener Oszillator in einem Hohlraum, der Schwarzkörperstrahlung enthielt, seine Energie nur in minimalen Schritten ändern kann, die später mit h (Planck-Konstante) bezeichnet wurden und in

proportionalem Verhältnis zur Frequenz ν der zugehörigen elektromagnetischen Welle stehen. Damit entdeckte Planck, dass Energie nicht kontinuierlich, wie von der klassischen Physik angenommen, sondern in diskreten Paketen oder diskreten Mengen – auch Quanta genannt – abgegeben wird, weshalb die Theorie den Namen „Quanten“-Theorie erhielt. Diese Quantisierung der Energie war der erste Schritt zur Entwicklung der physikalischen Theorie, die Materie und Wechselwirkungen auf atomarer Ebene als harmonische Oszillatoren beschreibt, die Energiepakete, sogenannte Quanta, austauschen: die Quantenmechanik (QM). Unerwartet offenbarte Plancks Formulierung jedoch eine noch tiefere Erkenntnis: die Entdeckung der Nullpunktsenergie.

Wie Planck selbst nach seiner Entdeckung der quantisierten Strahlungsemission durch das, was er als schwingende Hohlräume im Material beschrieb (Oszillatoren, die später als die Atome des Materials identifiziert wurden), feststellte: „Die Energie $\frac{1}{2}h\nu$ verbleibt im Oszillator selbst bei der absoluten Nulltemperatur, da der materielle Oszillator keine Energie abgibt, solange die gesamte durchschnittliche Energie kleiner als $h\nu$ ist“.^[3] Dies bedeutete, dass seine Gleichung zwar die richtige Beziehung zwischen der Frequenz ν des emittierten Lichts und der Temperatur lieferte (siehe die Grafik in Abbildung 3), aber auch implizierte, dass selbst bei null Kelvin, wo thermische Bewegung vollständig zum Stillstand kommen sollte, der Oszillator noch eine endliche Menge an potenzieller Energie besaß. Diese Restenergie, die ein unverzichtbarer Bestandteil von Plancks Gleichung für die Absorption und Emission eines Schwarzen Körpers war und die Ultraviolett-Katastrophe löste, und die selbst beim Herannahen an die absolute Nulltemperatur unweigerlich vorhanden ist, war der erste Hinweis auf die Existenz der Nullpunktsenergie. Man könnte sogar anmerken, dass er die eine Unendlichkeit durch eine andere ersetzt hat. Diese Nullpunktsenergie, in moderner Notation als NPE bekannt, wurde jedoch im Gegensatz zur Ultraviolett-Katastrophe experimentell bestätigt. Daher könnte man sagen, dass das Energiepotenzial, das sich in der früheren Rayleigh-Jeans-Theorie als unendliche ultraviolette Emission manifestierte, korrigiert wurde, um zu zeigen, dass es tatsächlich der Grundzustand des elektromagnetischen Feldes, also die NPE, ist, der die korrekten physikalischen Zusammenhänge beschreibt.

Die Bedeutung dieser Entdeckung kann nicht hoch genug eingeschätzt werden. Sie legte nahe, dass selbst unter den extremsten vorstellbaren Bedingungen – einem System, das nahezu auf den absoluten Nullpunkt abgekühlt ist – eine nicht weiter reduzierbare Menge an Energie vorhanden bleibt. Dies stand im Widerspruch zur klassischen Thermodynamik, die davon ausging, dass bei absoluter Nulltemperatur jegliche molekulare Bewegung zum Stillstand kommen sollte.

Das Rayleigh-Jeans-Gesetz für die Schwarzkörperstrahlung wird durch die Formel beschrieben:

$$I(\nu) = \frac{2\nu^2 k_B T}{c^2}$$

wobei:

$I(\nu)$ die Intensität der Strahlung bei der Frequenz ν ist,

c die Lichtgeschwindigkeit ist,

k_B die Boltzmann-Konstante ist, und

T die Temperatur des Schwarzen Körpers ist.

Gemäß dieser Formel steigt die Intensität mit dem Quadrat der Frequenz, was vorhersagt, dass hochfrequente Strahlung (im ultravioletten Bereich) überwiegt und zu einer unendlichen Energiemenge führen sollte, die ein Schwarzer Körper abgibt.

Wie wir gesehen haben, führte Plancks Untersuchung zur Optimierung der Glühlampeneffizienz zur Entdeckung des „Wirkungsquantums“ (der Konstante h) und ermöglichte es Planck, die Gleichung für die Strahlungsenergiedichte eines Schwarzen Körpers zu formulieren, ohne eine Divergenz (Vorhersage unendlicher Strahlungsleistung) im ultravioletten Spektrum zu erzeugen.

$$(\nu) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} kT \frac{1}{e^{h\nu/(kT)} - 1}$$

Dieses erste Gesetz löste die [Ultraviolett-Katastrophe](#), indem es ein endliches Spektrum bei hohen Frequenzen lieferte, und die entsprechende Strahlungsenergiedichte führte zum [Stefan-Boltzmann-Gesetz](#), das die Intensität der pro Flächeneinheit und Zeiteinheit bei einer gegebenen Temperatur abgegebenen Energie beschreibt. Es warf jedoch ein neues Problem auf, da die innere Energie U gemäß dem [Gleichverteilungssatz](#) (der Gleichverteilungssatz stellt eine Beziehung zwischen der Temperatur eines Systems und seinen durchschnittlichen Energien her) im klassischen Grenzfall hoher Temperaturen auf $k_B T$ reduziert werden sollte:

$$U = \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1} + \frac{1}{2}h\nu$$

In [Plancks](#) Formulierung, die die [Ultraviolett-Katastrophe](#) löste und die Vorhersagen mit den experimentellen Ergebnissen in Einklang brachte, sehen wir, dass die Energie des Systems (U) nicht auf null ($U \neq 0$) sinkt, wenn die [Temperatur](#) sich dem [absoluten Nullpunkt](#) nähert ($T \rightarrow 0$). Vielmehr bleibt, und dies ist für unsere Betrachtung der ersten mathematischen Ableitung des Konzepts der [Nullpunktsenergie](#) von zentraler Bedeutung, bei einer Temperatur, die sich dem absoluten Nullpunkt nähert ($T \rightarrow 0$), eine [Energie](#) von $E = \frac{1}{2}h\nu$ bestehen (wenn $T \rightarrow 0$, dann $U \rightarrow \frac{1}{2}h\nu$). Dieser Teil von Plancks Gleichung, $E_{T \rightarrow 0} = \frac{1}{2}h\nu$, ist die [Nullpunktsenergie](#). Durch die Betrachtung der Beziehung zwischen [Entropie](#) und der durchschnittlichen Energie eines elementaren Strahlers (eines materiellen Oszillators) erkennen wir in Plancks Gleichung die Entstehung der Nullpunktsenergie, denn selbst bei der Nulltemperatur (dem [Nullpunkt](#)) bleibt im materiellen Oszillator ein Energiebetrag von $E_{T \rightarrow 0} = \frac{1}{2}h\nu$. Wie Planck selbst feststellte: „Die Energie $\frac{1}{2}h\nu$ verbleibt im Oszillator selbst bei der absoluten Nulltemperatur, da der materielle Oszillator keine Energie abgibt, solange U kleiner als $h\nu$ ist.“

Es ist zu beachten, dass die stets vorhandene, fluktuierende Energie im Grundzustand eines materiellen Oszillators (oder, wie wir später sehen werden, auch eines [Quantenfeldes](#)) vor der [Heisenbergschen Unschärferelation](#) entdeckt wurde. Entgegen der weitverbreiteten Ansicht ist die [Nullpunktsenergie](#) also keine Vorhersage der [Heisenbergschen Unschärferelation](#). Dies werden wir später ausführlicher besprechen.

[Plancks](#) Formel erklärte nicht nur das beobachtete [Spektrum](#) der [Schwarzkörperstrahlung](#), sondern berücksichtigte auch [quantisierte Energieniveaus](#), wodurch die von der [klassischen Physik](#) vorhergesagte [Divergenz bei hohen Frequenzen](#) verhindert wurde. Sie war ein entscheidender Schritt in der Entwicklung der [Quantenmechanik](#) und markierte einen Bruch mit der klassischen Physik.

Die [Ultraviolett-Katastrophe](#) verdeutlichte die Grenzen der [klassischen Physik](#) bei der Beschreibung bestimmter Phänomene auf [atomarer](#) und [subatomarer](#) Ebene und ebnete den Weg für die revolutionären Konzepte der [Quantenmechanik](#) im frühen 20. Jahrhundert, von denen die Entdeckung der [Nullpunktsenergie](#) vielleicht die bemerkenswerteste ist.

Dieses Ergebnis aus theoretischen Überlegungen ist in vielen Fällen des Verhaltens materieller Systeme unter extrem niedrigen Temperaturen beobachtbar: vom [Bose-Einstein-Kondensat](#) über die [Elektronen-Cooper-Paare](#) in [Supraleitern](#) bis hin zur [Superfluidität](#). Aufgrund der [Nullpunktsenergie](#), beschrieben durch $U \rightarrow \frac{1}{2}h\nu$, bleibt [flüssiges Helium](#) unter [Standardatmosphärendruck](#) selbst bei [Temperaturen](#) nahe $T \rightarrow 0$ flüssig und gefriert nicht, da diese Energie die Teilchenbewegung aufrechterhält. Stattdessen wird Helium, wenn es unter seinen [Lambdapunkt](#) (die kritische Temperatur) abgekühlt wird, zu einem [Superfluid](#). Dies ist von Bedeutung für Überlegungen zur Natur des [Quantenvakuums](#), da in einigen Ansätzen der [theoretischen Physik](#), wie der [Superfluid-Vakuumtheorie](#) ([Bose-Einstein-Kondensat-Vakuumtheorie](#)), das [Vakuum](#) als [Superfluid](#) modelliert wird.^{[4][5]} Dabei können die [harmonischen Oszillatoren](#) des [Quantenvakuums](#) mit Nullpunktsenergie und das Spektrum [energetischer Moden](#) bis hin zu [Wellenlängen](#) der [Planck-Länge](#) und [Frequenzen](#) der [Planck-Frequenz](#) als ein Planck-Fluidplasma betrachtet werden (wie in [Die Herkunft der Masse und die Natur der Gravitation](#) von Hamein et al. beschrieben.^[6])

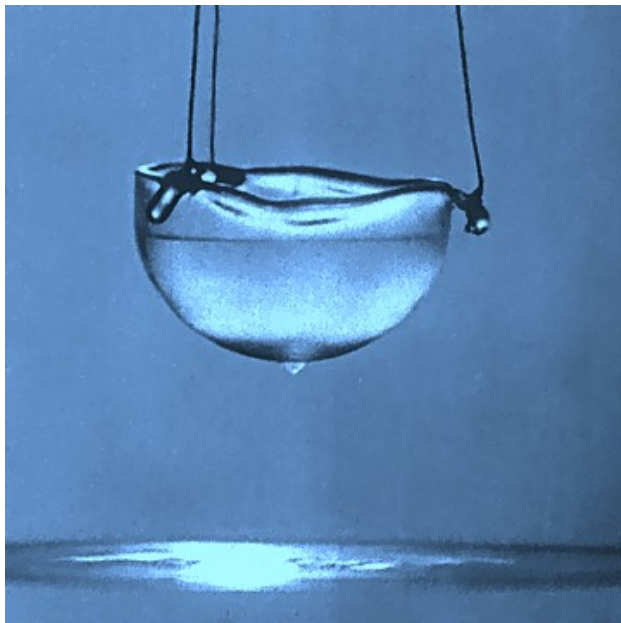


Abbildung 5. Flüssiges Helium behält kinetische Energie und gefriert unabhängig von der Temperatur unter Standardatmosphärendruck aufgrund der Nullpunktsenergie nicht. Die Nullpunktsenergie hat daher beobachtbare makroskopische Effekte, wie die Superfluidität von flüssigem Helium.

Eine wichtige Entsprechung, die weitgehend unbeachtet geblieben zu sein scheint, besteht darin, dass ein [Schwarzes Loch](#) ein perfekter [Schwarzer Körper](#) ist, da es [elektromagnetische Strahlung](#) mit nahezu 100 % [Effizienz absorbiert](#) (abgesehen von der [Hawking-Strahlung](#)). Wenn das [Quantenvakuum](#) in der gekrümmten [Raumzeitregion](#) des [Ereignishorizontes](#) eines [Schwarzen Loches](#) betrachtet wird, zeigen Berechnungen, dass es einen ganz spezifischen Effekt auf den Quantenvakuumzustand des [elektromagnetischen Feldes](#) gibt – die [Nullpunktsenergie](#) ist eine primäre Komponente des elektromagnetischen Feldes im [Vakuumzustand](#) –, es [thermalisiert](#) und [emittiert Photonen](#), die mit dem Schwarzen Loch selbst [korreliert](#) sind. Dies wird als [Unruh-Hawking-Strahlung](#) bezeichnet und ist ein zentraler Fokus der fundamentalen theoretischen Physik aufgrund von Problemen wie dem [Informationsverlustparadoxon](#), das mit der Verdampfung Schwarzer Löcher durch die Anregung des Nullpunktfeldes des Quantenvakuums verbunden ist, die zur Emission beobachtbarer Photonen führt. Tatsächlich kann die [Thermodynamik](#) des Ereignishorizontes eines Schwarzen Loches, ähnlich wie bei einem Schwarzen Körper, durch dieselbe Stefan-Boltzmann-Beziehung (das [Stefan-Boltzmann-Gesetz](#) der Schwarzkörperstrahlung) beschrieben werden, die Fläche und Temperatur verknüpft – im Fall des Schwarzen Loches charakterisiert dies sein Unruh-Hawking-[Emissionsspektrum](#). Es ist daher interessant zu bedenken, dass Schwarze Löcher nahezu perfekte Schwarzkörpersysteme sind und in gewisser Weise die Nullpunktsenergie und die Quantenmechanik durch die Modellierung von Materie als Schwarzes Loch entdeckt wurden (ein Schwarzer Körper als idealisierter perfekter Absorber und ein Schwarzes Loch als das der Natur am nächsten kommende Objekt dieser Art).

Am Nullpunkt: Ist diese allgegenwärtige Energie zugänglich?

Wenn es eine allgegenwärtige, nicht verschwindende [Grundzustandsenergie](#) in diesem Nullpunktfeld gibt, ein wahres „Meer an Energie“, warum bemerken wir dies nicht in unserem alltäglichen Erleben? Es wurde [empirisch](#) nachgewiesen, dass die Energie des [Quantenvakuums](#) existiert, etwa durch Experimente zum [Casimir-Effekt](#) (Abbildung 6) – ein Phänomen, bei dem durch die Veränderung der Randbedingungen in den [oszillierenden Fluktuationen](#) des Quantenvakuums eine [Kraft](#) erzeugt wird – erstmals 1948 von den Physikern [Casimir](#) und [Polder](#) vorhergesagt^[7] und 1997 experimentell bestätigt.^[8] Es besteht also kein Zweifel daran, dass das Nullpunktfeld real ist und beobachtbare Effekte hat –

tatsächlich bildet es die Grundlage der Quantenmechanik, da Quantensysteme aus Quantenfluktuationen des Vakuumzustandes bestehen. Dies bedeutet, dass die Eigenschaften von Materie nicht intrinsisch sind, sondern durch die Wechselwirkungen mit dem Nullpunktfeld entstehen.

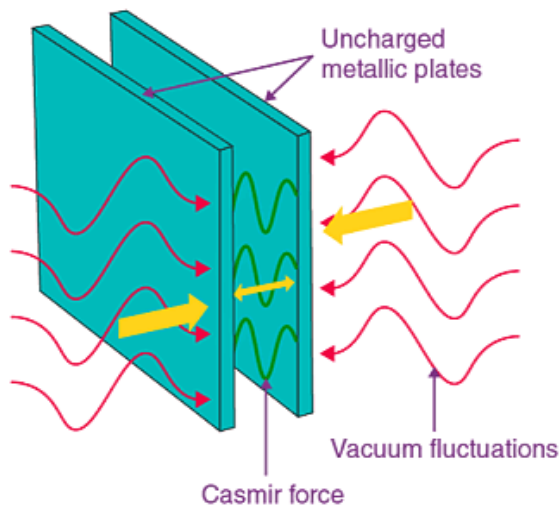
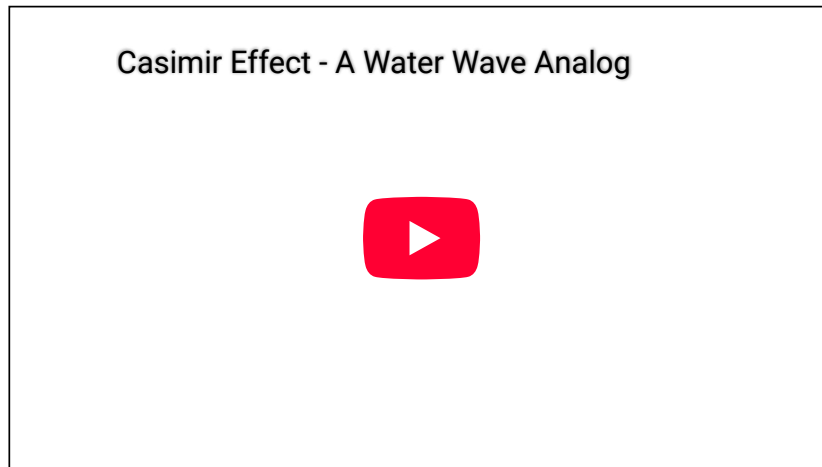


Abbildung 6. Der Casimir-Effekt: Der Casimir-Effekt ist eine physikalische Kraft, die aus den Quantenfluktuationen des Vakuums zwischen zwei eng beieinanderliegenden, ungeladenen, leitfähigen Platten entsteht. Dieser Effekt zeigt die Realität der Nullpunktsenergie und der Quantenfluktuationen im Vakuum. Randbedingungen: Wenn zwei parallele leitfähige Platten sehr nah beieinander platziert werden (im Abstand von Mikrometern), legen sie Randbedingungen für das elektromagnetische Feld fest. Dies verändert die Vakuumfluktuationen zwischen den Platten im Vergleich zur äußeren Region. Kraftentstehung: Aufgrund der eingeschränkten Moden des elektromagnetischen Feldes zwischen den Platten gibt es in diesem Bereich weniger Vakuumfluktuationen als außerhalb. Dieser Unterschied in der Energiedichte führt zu

einer anziehenden Kraft zwischen den Platten, bekannt als die Casimir-Kraft.

Visualisierung des durch Quantenfluktuationen des Vakuums hervorgerufenen Casimir-Effektes – Eine Analogie zu Wasserwellen



Obwohl die [Nullpunktsenergie](#) reale, greifbare Effekte hat und durch Methoden wie den [Casimir-Effekt](#) nachweislich zugänglich ist, besteht immer noch die weitverbreitete, irriige Annahme, dass die allgegenwärtige Energie des Quantenvakuums und das zugehörige Nullpunktfeld [technologisch](#) nicht genutzt werden können, um [Arbeit](#) zu erzeugen. Die Gründe für diese falsche Annahme sind vielfältig – jedoch ist ein häufiger Grund, dass fälschlicherweise angenommen wird, die Nutzung der [Energiedichte](#) des [Quantenvakuums](#), die aus [Nullpunktfluktuationen](#) stammt, würde die [Gesetze der Thermodynamik](#) verletzen. Die Einwände lauten in der Regel, dass es so wäre, als würde man versuchen, Wärme aus einem Eiswürfel zu gewinnen. Die konventionelle Perspektive geht im Allgemeinen davon aus, dass die [Nullpunktsenergie](#) der [Grundzustand](#) eines Systems (oder Feldes) ist, auch [Vakuumzustand](#) genannt, welcher ein [Gleichgewichtszustand](#) ist. Die Gesetze der Thermodynamik besagen, dass Energie nicht aus einem Gleichgewichtszustand extrahiert werden kann oder von einem niedrigen zu einem hohen Energiezustand fließen kann – daher sei jegliche Energie am Nullpunkt nicht verfügbar, da sie im Gleichgewicht und im niedrigsten Energiezustand eingeschlossen ist. Dies ist jedoch falsch, und wir werden Beispiele betrachten, in denen technologisch aus der Energiedichte des Quantenvakuums [Arbeit](#) gewonnen wird. Zunächst können wir diesen Irrtum jedoch schnell mit einem Beispiel aus der [Natur](#) widerlegen.

Nullpunktsenergie: Der Gecko und die Casimir-Kraft

Der [Gecko](#), eine bemerkenswerte kleine [Echse](#), kann Wände und Decken aus nahezu jedem Material erklimmen. Dies geschieht nicht durch [Saugwirkung](#) oder [elektrostatische Haftung](#), sondern durch eine Wechselwirkung mit [Quantenfluktuationen des Vakuums](#), die aus der [Nullpunktsenergie](#) des [elektromagnetischen Feldes](#) (dem Nullpunktfeld) stammen. Die Füße des Geckos sind mit Millionen mikroskopischer Härchen bedeckt (Abbildung 7), die, wenn sie nahe an die Oberfläche eines Materials gebracht werden, die Energie der Quantenfluktuationen des Vakuums verändern und eine anziehende Kraft zwischen den Härchen und der Oberfläche erzeugen, bekannt als [van-der-Waals-Kräfte](#), eine [mikroskopische Form des als Casimir-Kraft bekannten Volumeneffektes](#), der auf [Quantenfluktuationen](#) beruht.^[9] Die Fähigkeit des Geckos, nach Belieben schnell an nahezu jeder Oberfläche zu haften und sich wieder zu lösen, ist eine bemerkenswerte Form [evolutionärer Nanotechnologie](#), die die allgegenwärtigen [Fluktuationen des Quantenvakuums](#) auf natürliche Weise nutzt^[10] ([Gecko-Haftung: Evolutionäre Nanotechnologie](#)). Dieser natürliche Mechanismus ist so genial, dass [biomimetische Klebstoffe](#) nach dem Vorbild des Geckos in Zukunft zum Kleber der Zukunft werden könnten.^[11]

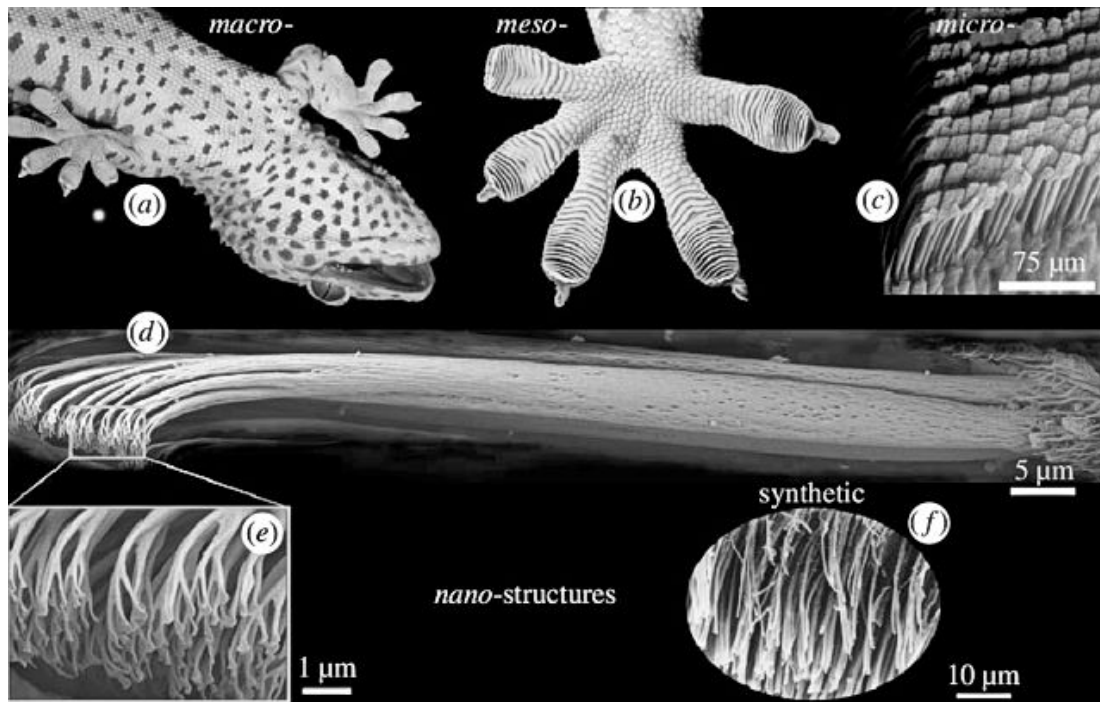


Abbildung 7. (b) Unterseite des Fußes eines Geckos, die eine Anordnung von haftenden Lamellen mit Borsten zeigt. Unter Vergrößerung ist das Wunderwerk der natürlichen Nanotechnik erkennbar, die eine kontrollierte Haftung über den Casimir-Effekt ermöglicht. (d) Hunderttausende mikroskopisch kleine Härchen, sogenannte Setae, die nur ein Zehntel des Durchmessers eines menschlichen Haares aufweisen, bedecken jede Lamelle und verfügen selbst (e) über eine nanoskalige Anordnung von Hunderten von Spatelspitzen, an denen die durch die Casimir-Kraft vermittelte Adhäsion der Quantenvakuumenergie stattfindet.

So extrahiert der bescheidene [Gecko](#) Arbeit aus der [Nullpunktsenergie](#) des Vakuumfeldes. Das Erklimmen von Wänden und das Festhalten an Decken ist Arbeit – selbst wenn das Tier ein [Äquivalent](#) von etwa 40 kg Gewicht trägt ([Die Kraft aus dem Nichts](#)) – es erfordert eine [Kraft](#), und diese Kraft wäre nicht möglich ohne das grenzenlose Meer von Energie der [Nullpunktfluktuationen](#) des [Quantenfeldes](#), aus dem der Gecko sie schöpft. Wenn also der Gecko die Energie der [Vakuumfluktuationen](#) nutzen kann, warum können wir das nicht? Tatsächlich zeigt [Die Herkunft der Masse und die Natur der Gravitation](#), wie die grundlegendsten physikalischen Eigenschaften, wie etwa [Masse](#) und [Kraft](#), der Energiedichte der Quantenvakuumfluktuationen entstammen.

Wie ist es möglich, dass der Gecko [Arbeit](#) aus dem [Grundzustand](#) oder dem [Quantenvakuum](#) des [elektromagnetischen Feldes](#) extrahiert? Ist der Grundzustand nicht das niedrigste mögliche [Energieniveau](#), bei dem keine nutzbare [Energie](#) für Arbeit verfügbar sein sollte? Nun, zunächst ist anzumerken, dass der Grundzustand eines physikalischen Systems im [Gleichgewichtszustand](#) eine enorme Energiemenge darstellen kann. Betrachten wir ein [Atom](#), dessen [Kern](#) aus mehreren [Nukleonen](#) besteht: Wenn es sich um ein [stabiles Isotop](#) handelt, befindet es sich in seiner niedrigsten Energiekonfiguration, d. h. in seinem [Grundzustand](#) – es kann sogar auf seinen [Vakuumzustand](#) abgekühlt werden. Und dennoch ist die [potenzielle Energie](#) so groß, dass bei einer „[Spaltung](#)“ des Atoms eine beträchtliche Menge an [kinetischer](#) und [thermischer Energie](#) freigesetzt würde.

Analog dazu hat der [Grundzustand](#) des [elektromagnetischen Feldes](#) einen nicht verschwindenden Energiewert, sodass das [Vakuum](#) des [Raumes](#) mit einer enorm hohen [Energiedichte](#) beginnt – es gibt keinen „leeren“ Raum! Wenn wir an den Grundzustand denken, neigen wir dazu anzunehmen, dass er keine [Energie](#) besitzt – doch dies ist falsch, wie wir am Beispiel eines stabilen [Isotops](#) eines Atoms gesehen haben. Die einfache Tatsache ist, dass der Grundzustand der [Natur](#) nicht bei null beginnt und auch nicht null erreichen kann, da es stets energetische Fluktuationen gibt – und, was wichtig ist, diese [Fluktuationen](#) resultieren nicht aus „[Unschärfe](#)“, sondern aus einer [intrinsischen](#), stets vorhandenen, nicht verschwindenden Energie. [Planck](#) entdeckte die [Nullpunktsenergie harmonischer Schwingungen](#) (etwa 15 Jahre bevor [Heisenbergs Unschärferelation](#) formuliert wurde), und diese Erkenntnis stammte direkt aus der Anpassung seiner Gleichungen, die das [Emissionsspektrum](#) eines erhitzten Objektes (wie

das einer [Glühlampe](#)) beschreiben, an dessen beobachtetes Verhalten. Wenn ein Nullpunktsenergieterm nicht berücksichtigt würde, wären die Gleichungen zur Beschreibung der Strahlung eines Materials, wie des Glühlampenfadens, falsch – und, wie wir noch besprechen werden, katastrophal falsch.

Die bemerkenswerte Fähigkeit von [Organismen](#), nahezu jede Eigenschaft der Natur zum [selektiven](#) Vorteil zu nutzen, sollte wenig überraschen, wenn man bedenkt, dass ein bestimmter Organismus, die bescheidene [Gecko-Echse](#), Anpassungen entwickelt hat, die durch natürliche [Evolution](#) entstanden sind und es ihr ermöglichen, die kollektiven anziehenden Kräfte zu nutzen, die in [Molekülen](#) aufgrund der [Quantenfluktuationen](#) des Nullpunktfeldes entstehen. Allgemeiner betrachtet handelt es sich bei den Molekülen, die die [Zellen](#) bilden, aus welchen der biologische Organismus besteht, jedoch um [Quantensysteme](#). Trotz der [Metastabilität](#) dieser Moleküle bestehen sie im Kern aus kollektiven Quantenfluktuationen, da dies die Natur von Quantensystemen ist, weshalb die [Nullpunktsenergie](#) die Grundlage der [Quantenmechanik](#) bildet.

Daher gibt es Grund zu der Annahme, dass das Nullpunktfeld eine fundamentalere und integralere Rolle im biologischen System spielt als das spezifische Beispiel der Füße des [Geckos](#). Tatsächlich bereiten wir derzeit eine Veröffentlichung im Bereich der [Biophysik](#) vor, die eine [Skalierungsbeziehung](#) des Energiekopplungsmechanismus zwischen [Quantenfluktuationen des Vakuums](#) und [essenziellen molekularen](#) Strukturen in der [Zelle](#) aufzeigt, die dem [intrazellulären Stoffwechsel](#) und der Informationsverarbeitung zugrunde liegen und letztlich mit der [neuronalen Aktivität des Gehirns](#) korrelieren. Darüber hinaus haben Forscher die Rolle von Quantenfluktuationen des Vakuums und des Nullpunktfeldes bei der Bildung [kohärenter](#) Domänen in Wasser untersucht^[12] sowie die Möglichkeit, dass die langreichweitige Synchronisation im Gehirn durch einen bottom-up-Orchestrierungsprozess entsteht, der das Nullpunktfeld einbezieht. Ein zentrales Merkmal dieses Prozesses ist die Bildung, Ausbreitung und Synchronisation von Kohärenzdomänen.^[13] Die [Nullpunktsenergie](#) liegt der [Quantenmechanik](#) zugrunde, und die Quantenmechanik wiederum bildet die Grundlage für die molekulare Funktion des biologischen Systems. Daher könnte die Nullpunktsenergie sowohl für die Quantenmechanik als auch für das Leben fundamental sein.

Wie viel Energie steckt im Nullpunktfeld?

Die [Quantenfeldtheorie](#) zeigt uns, dass an jedem denkbaren Punkt im Raum [Quantenharmonische Oszillatoren](#) existieren, die sehr spezifische [Winkelgeschwindigkeiten](#) energetischer [Moden](#) annehmen können. Selbst in einem scheinbaren [Vakuum](#), wenn die Quantenharmonischen Oszillatoren auf dem niedrigsten oder Nullpunktenenergieniveau sein sollten, unterliegen die [Oszillatoren](#) kontinuierlichen energetischen Fluktuationen, sogenannten [Quantenvakuumfluktuationen](#). Diese [Quantenvakuumenergie](#) ist im freien Raum in der Regel nicht offensichtlich, da sie [dekohärent](#) ist, sodass die Fluktuationen der Oszillatoren [destruktiv interferieren](#) und die Energie maskieren oder [abschirmen](#). Wenn sich die Quantenvakuumfluktuationen jedoch in einer [kohärenten Phase](#) befinden, [addieren sich die Energien](#) jedes winzigen Quantenharmonischen Oszillators konstruktiv, und die kollektive Energie aller Moden selbst in einem kleinen Raumvolumen ist enorm groß. Tatsächlich entspricht die ungeschirmte [Quantenvakuumenergie](#), oder der Vakuum Erwartungswert, in einem Volumen von der Größe eines Protons der [Masse-Energie](#) des beobachtbaren [Universums](#). In einer Studie der International Space Federation zur [Energiedichte](#) des [Quantenvakuums](#) in Regionen hoher [Kohärenz](#), bewertet durch [Korrelationsfunktionen](#) von [Erzeugungs- und Vernichtungsoperatoren](#), wird gezeigt, dass die Energiedichte des ungeschirmten Quantenvakuums etwa $8,90 \times 10^{113}$ Joule pro Kubikmeter beträgt.

Eine gängige Analogie, um ein Gefühl für die Menge an [Energie](#) in den [elektromagnetischen Quantenvakuumfluktuationen](#) zu vermitteln, beschreibt eine Kaffeetasse voller [Nullpunktsenergie](#), die angeblich genug Energie enthält, um das gesamte Meerwasser auf der Erde zum Kochen zu bringen. Dieser Wert ist nicht nur untertrieben, sondern liegt auch ganze 82 [Größenordnungen](#) zu niedrig. Es würden etwa 10^{27} Joule benötigt, um tatsächlich alles Wasser auf der Erde zu verdampfen, während sich in einer Kaffeetasse etwa 10^{109} Joule (eine Eins mit 109 Nullen) an Quantenvakuumenergie befinden.

Versuchen wir also zu verdeutlichen, wie viel [Arbeit](#) mit dieser Menge an [Quantenvakuumenergie](#) in einer Kaffeetasse geleistet werden könnte, da „das Verdampfen aller Ozeane auf der Erde“ nur einen verschwindend geringen Bruchteil der verfügbaren Gesamtenergie darstellt. Ein [Joule](#) ist die Menge an Arbeit, die benötigt wird, um ein [Watt Leistung](#) für eine [Sekunde](#) zu erzeugen. Daher werden 100 Joule

benötigt, um eine [100-Watt-Glühlampe](#) für eine Sekunde zu betreiben. 10^{109} Joule sind genug Energie, um eine 100-Watt-Glühlampe für etwa 10^{100} Jahre (ein [Googol](#)) zu betreiben ... Mit anderen Worten, man könnte 100 [Milliarden](#) Glühlampen (10^{13} Joule) auf jedem [Planeten](#) im [Universum](#) – laut [NASA](#) etwa 10^{24} (eine [Billion](#)-Billionen Planeten, was eine Gesamtleistung von etwa 10^{37} Watt erfordern würde) – für die Lebensdauer des Universums (etwa 10^{17} Sekunden, was etwa 10^{54} Joule erfordern würde) betreiben und dies in 10^{55} Universen tun!

Sie könnten also etwa 10^{55} Universen mit Energie versorgen, jedes mit:

- 10^{24} Planeten,
- 10^{11} 100-Watt-Glühlampen pro Planet,
- für die gesamte Zeit, die unser Universum existiert (13,8 Milliarden Jahre), für jedes Universum.

Diese Berechnung verdeutlicht die atemberaubende theoretische [Energiedichte](#) der [Quantenvakuumenergie](#) – selbst in einem kleinen Volumen wie dem einer Kaffeetasse!

Sollte es tatsächlich ein [Multiversum](#) geben, könnte das Volumen einer Kaffeetasse mit der [Energie kohärenter](#) (unmaskierter) [Quantenvakuumfluktuationen](#) ausreichend [Leistung](#) liefern, um eine [Zivilisation](#) auf jedem [Planeten](#) in einem [Universum](#) für zehn [Quintillionen](#)-Quintillionen-Quintillionen Universen zu versorgen.

Der [Vakuumerwartungswert](#) des [Quantenvakuums](#) stammt aus der [Quantenmechanik](#) – doch etwas Interessantes geschieht, wenn man die Auswirkungen auf die [Raumzeitkrümmung](#) betrachtet, da die einsteinschen Feldgleichungen in der [allgemeinen Relativitätstheorie](#) zeigen, dass [Energie](#) die [Raumzeit](#) krümmt oder geometrisiert. Dies gilt auch für die ungeschirmte [Energiedichte](#) des Quantenvakuums. In einer Region hoher [Kohärenz](#) von [Quantenvakuumfluktuationen](#), wie sie bei der [Compton-Wellenlänge](#) eines [Protons](#) auftritt, krümmt sich die Raumzeit so stark, dass sie die Energie der [Quantenfluktuationen](#) einschließt und diese effektiv auf einen viel niedrigeren Energiewert abschirmt. Bemerkenswerterweise erzeugt eine erste Abschirmung der [Nullpunktsenergie](#) exakt die Bedingung, die für die [Schwarzschild-Bedingung](#) erforderlich ist, also für ein [Schwarzes Loch](#) auf der [Protonenskala](#) (der [reduzierten Compton-Wellenlänge](#), siehe Referenz [Die Herkunft der Masse und die Natur der Gravitation](#)^[6]).

Die [Energie des Vakuums](#), wie sie von der [Quantenfeldtheorie](#) beschrieben wird, krümmt die [Raumzeit](#) – wie in der [allgemeinen Relativitätstheorie](#) beschrieben – und führt zu einem [Schwarzen Loch](#) mit einem [Ereignishorizontradius](#), der exakt der [Compton-Wellenlänge](#) des [Protons](#) entspricht, und einer [Schwarzschild-Masse](#) eines protonengroßen Schwarzen Loches, die als die „unbekleidete“ Masse des Protons betrachtet werden kann, in der [Quantentheorie](#) allgemein als „nackte“ Masse bezeichnet. Die [Hawking-ähnliche Strahlung](#) vom [Ereignishorizont](#) dieses Schwarzen Loches strahlt [isotherm](#) bis zum [Ladungsradius](#) des Protons ab und durchläuft dabei eine zweite Abschirmung, bei der sie exakt der beobachteten [Masse-Energie](#) der [Ruhemasse](#) des Protons entspricht. Wir sehen also, dass wir durch die Verbindung von [Quantenmechanik](#) ([Nullpunktsenergie](#)) und [allgemeiner Relativitätstheorie](#) vollständig verstehen können, was ein [Teilchen](#) ist und woher die [Masse](#) stammt. Am wichtigsten ist, dass wir erkennen, dass Masse keine unveränderliche [intrinsische](#) Eigenschaft der [Materie](#) ist, sondern durch die [Korrelation](#) zwischen den [Harmonischen Oszillatoren](#) des [Quantenvakuums](#) und der [Raumzeitkrümmung](#), also der [allgemeinen Relativitätstheorie](#), entsteht.

Aus diesem Ansatz zur Herkunft der [Masse](#), die aus der [Nullpunktsenergie](#) resultiert, wird [Einsteins](#) ursprüngliche Formulierung, $M = \frac{E}{c^2}$, klar, und wir sehen, dass die Beziehung zwischen dem E -Term und dem M -Term der [Energie](#) der [Quantenvakuumfluktuationen](#) des [Nullpunktfeldes](#) entspricht.

Die sehr reale und greifbare Natur der [Nullpunktsenergie](#) und der damit verbundenen [Quantenvakuumfluktuationen](#) wurde durch eine umfangreiche experimentelle Validierung getestet, wie in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1. Liste physikalischer Effekte, die auf der Nullpunktsenergie (NPE) basieren, mit der theoretischen Vorhersage oder der Erklärung nach dem Experiment und der entsprechenden experimentellen Validierung.

NPE-basierter Effekt	Theoretische Vorhersage/Erklärung	Experimentelle Validierung
Schwarzkörperstrahlung	Planck (1900-1912)	Kirchhoff (1860)
Spontane Photonenemission / Lamb-Verschiebung	Einstein (1916) / Bethe (1947)	Lamb-Retherford (1947)
Erzeugung von Elektron-Positron-Paaren	Dirac (1928)	Anderson (1932)
Schwinger-Effekt	Sauter (1931) - Schwinger (1951)	National Graphene Institute – Geim (2022)
Breit-Wheeler-Effekt	Breit-Wheeler (1934)	Pike et al. (2014)
Vakuum-Doppelbrechung	Heisenberg – Euler (1936)	STAR-Experiment (2021) – IXPE (2022)
Casimir-Effekt	Casimir (1948)	Lamoreaux (1997)
Casimir-Drehmoment	Casimir (1948)	Somers (2018)
Funktionale Casimir-Geräte	Casimir (1948)	Li et al. (2022)
Dynamischer Casimir-Effekt	Moore (1970)	Wilson (2011)
Higgs-Mechanismus	Anderson (1962)	LHC (2013)
Hawking-Strahlung-Unruh-Effekt	Hawking-Zel'dovich (1972-1973) – Unruh (1976)	Wang et al. (2023) – Afshordi et al. (2023)

Weitere Beispiele umfassen funktionale Casimir-Geräte (Kontrolle des Quantenvakuums für den Energietransfer und für funktionale Casimir-Geräte), Methoden zur Nutzung des [Quantenvakuums](#) und sogar ein angeblicher „Quantenantrieb“ (Raumzeit-Technik und die Nutzung der Nullpunktsenergie des Quantenvakuums).

Technologische Verfahren zur Nutzung der Quantenvakuumfluktuationen aus dem Nullpunktfeld

Wir haben gesehen, wie die nicht-triviale Energie des [Quantenvakuums](#) unsere alltägliche Welt ausmacht: Zum Beispiel haben wir in *Der Ursprung der Masse und die Natur der Gravitation*^[6] gezeigt, dass Materie aus Vakuumfluktuationen besteht, und wir haben dieses Verständnis angewendet, um zu zeigen, wie Teilchenmassen entstehen. Wir haben auch erkannt, dass diese [konstitutive Fluktuation](#) der [Energiedichte](#) des Raumes auf sehr kurzen Distanzen und Zeitskalen nicht nur theoretischer Natur ist – ihre Effekte wurden [empirisch](#) beobachtet und charakterisiert. Der bekannteste Effekt davon ist die [Casimir-Kraft](#), die in ihrer einfachsten Form eine Anziehung zwischen Objekten erzeugt, welche sich in submikrometergroßen Abständen befinden, indem die Objekte bestimmte [Moden](#) der [Quantenvakuumfluktuationen](#) aufheben und dadurch eine Kraft erzeugen – die jedoch auch dazu genutzt wurde, abstoßende Kräfte (für die [Levitation](#)) zu erzeugen, [Photonen](#) aus dem Vakuum durch den dynamischen Casimir-Effekt freizusetzen und zudem verwendet wurde, um nichtlineare Schwingungen^[14], den Quanteneinfang^[15], den Phononentransfer^[16] und die Dissipationsverdünnung^[17] zu realisieren.

Wie ersichtlich, gibt es zahlreiche mögliche technische Anwendungen des [Casimir-Effektes](#), nicht zuletzt eine [Levitationskraft](#), wenn die richtige Geometrie zur Anwendung kommt ([Chiralität macht die Casimir-Kraft abstoßend](#),^{[18][19]}) Es gibt auch das aufstrebende Feld der funktionalen Casimir-Geräte, wobei ein Forscherteam Casimir-Dioden und Casimir-Transistoren entwickelt hat. Die Casimir-Diode ist ein nicht-reziprokes Gerät, das auf [Quantenvakuumfluktuationen](#) basiert und eine [unidirektionale](#) Übertragung von Energie ermöglicht, ähnlich wie eine [Diode](#). In einer Veröffentlichung im Fachjournal [Nature Nanotechnology](#) im Jahr 2022 berichtete das Team von einer durch das [Quantenvakuum](#) vermittelten nicht-reziproken Energieübertragung zwischen zwei [mikromechanischen Oszillatoren](#).^[20]

Das Forscherteam unter der Leitung von Tongcang Li vom Institut für Quantenwissenschaft und -technik der [Purdue-Universität](#), das die Studie veröffentlichte, gehörte zu den ersten Gruppen, die einen genialen Durchbruch bei der Nutzung von [Quantenvakuumfluktuationen](#) demonstrierten, um den Energietransfer auf der [Nanometerebene](#) zu steuern und funktionsfähige Casimir-Geräte zu entwickeln. Erinnern wir uns daran, dass die herkömmliche Sichtweise auf die [Nullpunktsenergie](#) und die Quantenvakuumenergie besagt, dass sie nicht zugänglich ist und nicht zur Verrichtung von Arbeit genutzt werden kann. Dennoch

gibt es eine neue Klasse von Geräten, die den Casimir-Effekt nutzen und durch die Verwendung des Energiegradienten funktionieren, welcher in der Energiedichte des Nullpunktfeldes durch etwas so Einfaches wie eine Randbedingung oder, im Falle der Casimir-Diode, eine oszillierende Membran induziert wird.

Ähnlich wie bei der Steuerung von elektrischem Strom mit Dioden gibt das Forscherteam an, eine effiziente „Casimir-Diode“ entwickelt zu haben, die den Energietransfer, der durch die Casimir-Wechselwirkung gekoppelt ist, gleichrichten kann. Das Forscherteam erklärt, dass die Nicht-Reziprozität, also die unidirektionale Energieübertragung, durch dynamische Modulation der nichtlinearen Casimir-Wechselwirkung in einer speziell konstruierten optischen Kammer verwirklicht wird, in der die Frequenzmoden der Membranen zweier mikromechanischer Oszillatoren mittels Licht gekoppelt und dynamisch auf einen speziellen Zustand der Frequenzmodulation, den sogenannten Ausnahmepunkt (siehe Abbildung 8), moduliert werden – eine optisch-mechanische Technik. Durch die Nutzung der starken Nichtlinearität der Casimir-Wechselwirkung und der asymmetrischen Struktur in der Nähe des Ausnahmepunktes, um die Zeitumkehrsymmetrie zu brechen, indem der Abstand zwischen zwei Kragarmen (den mikromechanischen Resonatoren) mit der gewünschten Frequenz und Amplitude moduliert wird, haben die Forscher eine nicht-reziproke Energieübertragung mit der Casimir-Wechselwirkung erreicht. Darüber hinaus demonstrierte das Team einen Casimir-Effekt mit drei Körpern und entwickelte auf Basis dieser Forschung einen Casimir-Transistor.^[21]

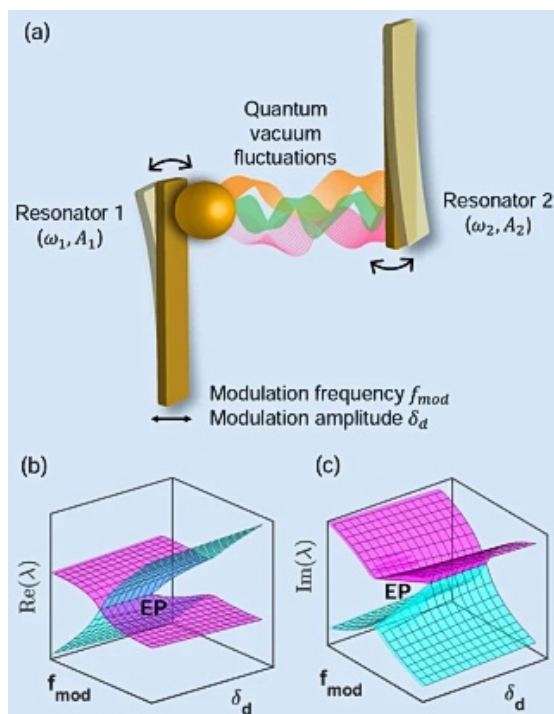


Abbildung 8. Casimir-Effekt im Doppel-Kragarmsystem und Eigenwerte in der Nähe des Ausnahmepunktes. (a): Zwei modifizierte Kragarme mit Resonanzfrequenzen ω_1 und ω_2 erfahren eine Casimir-Kraft aufgrund von Quantenvakuumfluktuationen. Die Schwingungsamplituden der beiden Kragarme werden als A_1 und A_2 bezeichnet. Eine zusätzliche langsame Modulation mit einer Frequenz f_{mod} und einer Amplitude δd wird auf Resonator 1 angewendet, um eine parametrische Kopplung zu verwirklichen. (b) und (c): Der Realteil und der Imaginärteil der Eigenwerte werden als Funktion der Modulationsfrequenz f_{mod} und der Modulationsamplitude δd dargestellt. Die beiden Eigenwerte zeigen eine nicht-triviale topologische Struktur in der Nähe des Ausnahmepunktes (EP). Bild und

Beschreibung aus ^[21] Z. Xu, X. Gao, J. Bang,
Z. Jacob und T. Li, „Nicht-reziproke
Energieübertragung durch den Casimir-
Effekt,“ Nat. Nanotechnol., Bd. 17, Nr. 2, Art.
Nr. 2, Feb. 2022.

Ein weiteres Forscherteam unter der Leitung von Professor Garret Model von der [Universität Colorado Boulder](#) gibt an, Geräte entwickelt zu haben, die Leistung aus [Quantenfluktuationen](#) der [Nullpunktsenergie](#) erzeugen, basierend auf der Bildung einer Casimir-Kammer auf einer Seite eines Metall-Isolator-Metall (MIM)-Tunnelgerätes (Abbildung 9).

Tunneling through Metal-Insulator-Metal Barrier in Presence of Zero-Point Energy Radiation

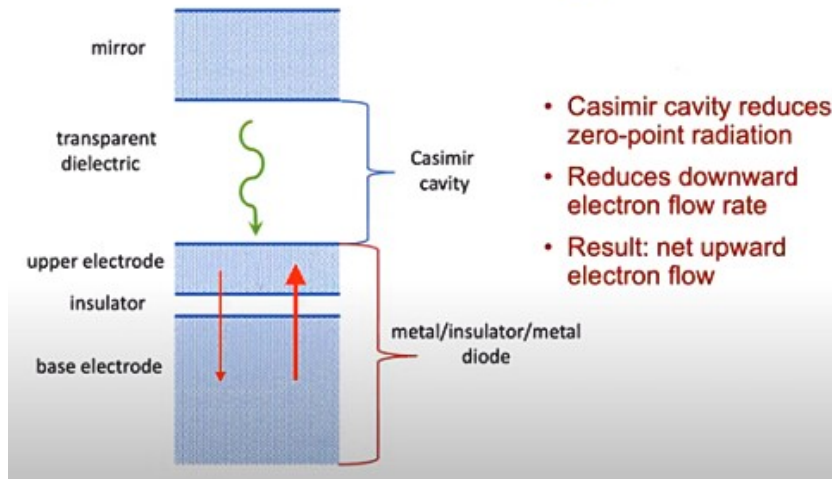


Abbildung 9. Das erfolgreiche Gerät der Model-Forscherguppe, das Energie aus dem Nullpunktfeld gewinnt.

Das Forscherteam hat Ergebnisse veröffentlicht, die zeigen, dass ein solches MIM-Casimir-Kammer-Gerät ohne angelegte Spannung einen messbaren elektrischen Strom zwischen den beiden Metallschichten erzeugt^{[22][23]} („Änderungen der Leitfähigkeit mittels einer Casimir-Kammer“) und („Strom mittels einer optischen Kammer“). Darüber hinaus hat die Forschergruppe vorgeschlagen, kontinuierlich Energie aus dem Nullpunktfeld zu gewinnen, indem Gas durch eine Casimir-Kammer fließt (Abbildung 10). Wie sie beschreiben:

„Wenn die Gasatome in eine Casimir-Kammer gepumpt werden, in der [langwellige Moden](#) des Nullpunktfeldes ausgeschlossen sind, gehen die [Elektronen](#) in niedrigere Energiezustände über und geben dabei Energie frei. Diese Energie wird in einem lokalen Absorber gesammelt. Wenn die Elektronen die Casimir-Kammer verlassen, werden sie durch die umgebenden Nullpunktfelder wieder in ihre ursprünglichen Energiezustände zurückversetzt. Der Prozess wird wiederholt, um kontinuierlich [Leistung](#) zu erzeugen. Auf diese Weise funktioniert das Gerät wie eine [Wärmepumpe](#) für [Nullpunktsenergie](#), indem es diese global aus dem [elektromagnetischen Quantenvakuum](#) gewinnt und in einem lokalen Absorber sammelt. Diese Energie kann zur Erwärmung genutzt oder in elektrische Leistung umgewandelt werden.“^[24]

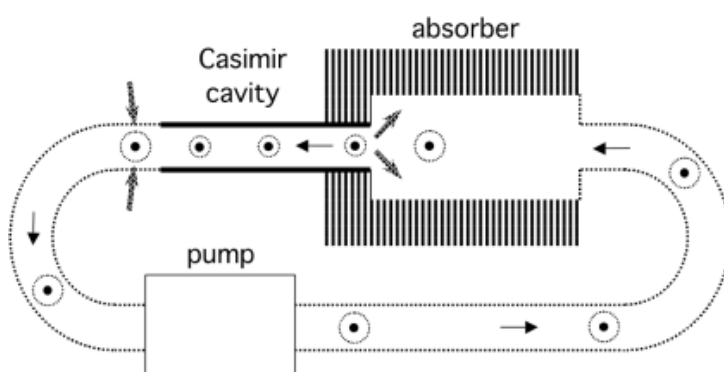


Abbildung 10. Schematische Darstellung des Prozesses zur Gewinnung von Vakuumenergie. Gas zirkuliert durch das System. Die Elektronenorbitale der Gasatome gehen beim Eintritt in die Casimir-Kammer in ein niedrigeres Energieniveau über und geben die überschüssige Energie an den Absorber ab. Beim Verlassen der Kammer werden die Orbitale durch das umgebende Nullpunktfeld wieder in ihren ursprünglichen Energiezustand zurückversetzt. Auf diese Weise wird Energie aus dem umgebenden Nullpunktfeld gesammelt und auf dem Absorber abgelagert.
 Bild und Bildbeschreibung angepasst aus ^[24] O. Dmitriyeva und G. Model, „Prüfung der Emission von Nullpunktsenergie durch Gase, die durch Casimir-Kammern fließen“, Physics Procedia, Bd. 38, S. 8–17, 2012, doi: [10.1016/j.phpro.2012.08.007](https://doi.org/10.1016/j.phpro.2012.08.007).

Die Ergebnisse der Model-Forschungsgruppe basieren auf der Tatsache, dass die mit dem [Vakuumzustand](#) verbundene [Nullpunktsenergie](#) von der Struktur ihrer Umgebung abhängt – das heißt, sie ist geometrieabhängig, was zum Teil auch die Ursache für den [Casimir-Effekt](#) ist. Aus einer bestimmten Perspektive kann dies eine Möglichkeit sein, die [Hawking-Strahlung](#) eines [Schwarzen Loches](#) zu erklären (siehe unseren Artikel [Quantum Black Holes](#) für weitere Informationen zur [Hawking-Strahlung](#)): Die Veränderung des Oberflächenradius eines [Sterns](#) zum Oberflächenradius eines [Ereignishorizontes](#) stellt eine Veränderung der Randbedingungen oder der [Geometrie](#) um das [Vakuum](#) herum dar und führt dazu, dass aus der Energie der [Quantenvakuumfluktuationen](#) thermische [Photonen](#) emittiert werden. Dies ist es, was eine Casimir-Kammer bewirkt: Sie verändert die lokale Struktur des Vakuums, erzeugt einen [Gradienten](#) in der [Energiedichte](#), verändert den universellen [Grundzustand](#) des Meeres der [Nullpunktsenergie](#), sodass es zugänglich wird – und dies führt dazu, dass [Arbeit](#) aus der Energiedichte des [Quantenvakuums](#) gewonnen wird. Wenn wir eine Casimir-Resonanzhöhle mit den Abmessungen eines [subatomaren Teilchens](#) betrachten würden, wie es in der Studie [Der Ursprung der Masse und die Natur der Gravitation](#) getan wurde, sodass die Casimir-Höhle einen Radius hätte, der dem [Ladungsradius](#) des [Protons](#) entspricht, würde die erzeugte [Casimir-Kraft](#) tatsächlich der beobachteten [Ruhemasse](#) des Protons entsprechen und der [starken Wechselwirkung](#) gleichkommen, wie sie für die Einschließung erforderlich ist.

Obwohl der [Casimir-Effekt](#) unbestreitbar zeigt, dass aus dem [Vakuumzustand](#) [Energie](#) gewonnen werden kann – in Form der Casimir-Kraft, die [Arbeit](#) an den Platten im experimentellen Aufbau verrichtet –, besteht eine häufige Kritik an den [Implikationen](#) für technische Anwendungen darin, dass der Effekt gering ist, also nur wenig Energie liefert. Daher zielen die meisten Anwendungen auf eine Entwicklung auf [Nanometerebene](#) ab (beispielsweise [reibungsfreie Nanomaschinen](#)), auf [Mikrogeräte](#) und möglicherweise auf [Levitation](#) im kleinen Maßstab. Es gibt jedoch deutlich [effizientere](#) Methoden, um in der [Energiedichte](#) des [Quantenvakuums](#) potenziell einen [Gradienten](#) zu erzeugen – und zwar nicht nur durch Geometrie allein, sondern durch die Nutzung des [Spins](#). Wir können die Auswirkungen des [Drehimpulses](#) in Flüssigkeitssystemen beobachten, beispielsweise in [planetarischen Atmosphären](#): Wenn Systeme mit hohem Drehimpuls vorliegen, wie [Hurrikane](#) und [Tornados](#) auf der [Erde](#) oder Wirbel wie der [Große Rote Fleck](#) auf dem [Jupiter](#), ist dies mit starken Energie- oder Druckunterschieden verbunden. Das Erzeugen eines Wirbels mit hohem Drehimpuls aus einem [Plasma](#), das an das [Quantenvakuum](#) gekoppelt ist, könnte einen Energiegradienten erzeugen, der weitaus bedeutender ist als derjenige, der durch die kleinen nichtleitenden Platten im [Casimir-Effekt](#) erzeugt wird. Obwohl er auf denselben Prinzipien beruht, kann er potenziell zu einem viel größeren Energiefluss aus dem [Nullpunktfeld](#) und der [Energiedichte](#) des [Quantenvakuums](#) führen.

Diese letztgenannte Überlegung ist bedeutsam, denn wenn wir von [quantenharmonischen Schwingungen](#) sprechen, die die [Energiedichte](#) des [Quantenvakuums](#) ausmachen, dann sprechen wir über rotierende [Oszillatoren](#). Lassen Sie uns dies genauer untersuchen, um zu verstehen, warum das so ist.

Der Spin harmonischer Oszillatoren

In der [Quantenmechanik](#) bezeichnet die [reduzierte Planck-Konstante](#) ($\hbar$, ausgesprochen als h-Quer), auch bekannt als [Dirac-Konstante](#), eine [Quanteneinheit](#) des [Drehimpulses](#), die man erhält, indem man die [Planck-Konstante](#) (h , wie wir sie in den vorherigen Gleichungen gesehen haben) durch 2π

(Winkelrotation) dividiert. Da die reduzierte Planck-Konstante eine entscheidende Rolle bei der Beschreibung eines [quantenharmonischen Oszillators](#) spielt, lässt dies vermuten, dass Oszillatoren eher als Systeme mit einem **Winkel- oder Rotationsverhalten** betrachtet werden können als streng linear.

Die [reduzierte Planck-Konstante](#) $\hbar$ stellt in der [Quantenmechanik](#) die kleinste mögliche Einheit des [Drehimpulses](#) dar. Der Drehimpuls in Quantensystemen, wie [Atomen](#) oder [Teilchen](#), ist [quantisiert](#), was bedeutet, dass er in [diskreten](#) Einheiten existiert, die ganzzahlige Vielfache von $\hbar$ sind. Dieses Konzept des quantisierten Drehimpulses deutet darauf hin, dass jeder Oszillator in einem Quantenzustand von Natur aus winkelförmige Eigenschaften besitzt. Der [quantenharmonische Oszillator](#) ist ein grundlegendes System in der Quantenmechanik, das häufig verwendet wird, um die Teilchen in [Potentialtöpfen](#) oder die Schwingungen von Atomen in den Molekülen zu modellieren. Obwohl den Physikstudenten ein [Oszillator](#) üblicherweise als eine Feder mit einem Gewicht am Ende visualisiert wird (Abbildung 13), ist es viel präziser – möchte man die Dynamik der Entstehung von Teilchen im Universum verstehen –, den harmonischen Oszillator als ein rotierendes Objekt mit einer Pulsationsfrequenz von ω zu betrachten (Abbildung 11).

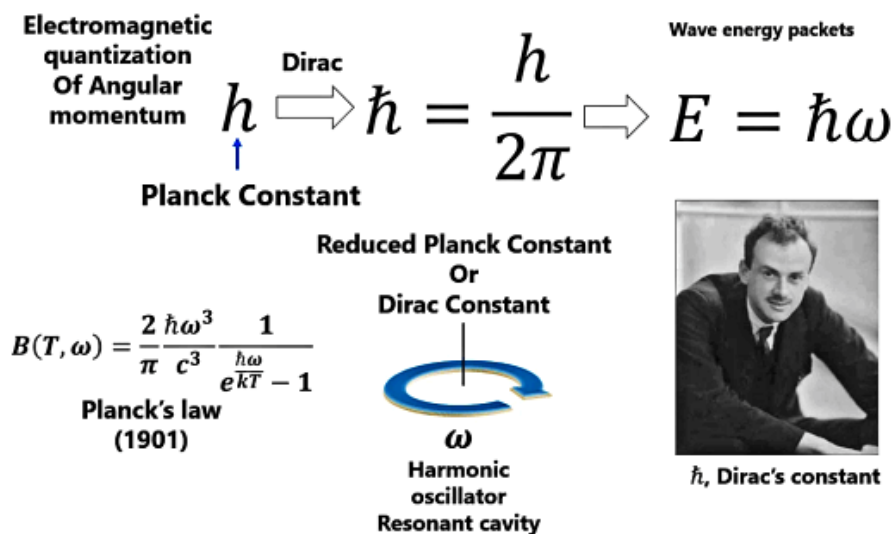


Abbildung 11. Veranschaulichung, wie die Planck-Konstante zu einer Quanteneinheit des Drehimpulses wird (Dirac-Konstante); da die Wellenenergiepakete durch $\hbar\omega$ beschrieben werden, impliziert dies, dass Energieübergänge selbst einen Spin aufweisen und eine Übertragung von Drehimpuls darstellen. Auch das Plancksche Gesetz (unten links im Bild) wird durch $\hbar\omega$ beschrieben und zeigt, dass die Nullpunktsenergie harmonischer Oszillatoren eine Rotationsenergie mit einer Pulsationsfrequenz von $\hbar\omega$ darstellt.

Da in der [quantenmechanischen](#) Behandlung $E = \hbar\omega$ gilt, erkennen wir, dass das Verhalten des [Oszillators](#) durch [Wellenfunktionen](#) mit diskreten [Energieniveaus](#) (quantisiert in Einheiten von $\hbar$, Abbildung 11) beschrieben wird, und aus der [Mathematik](#) geht klar hervor, dass die Energieniveaus durch den Drehimpuls miteinander verbunden sind.

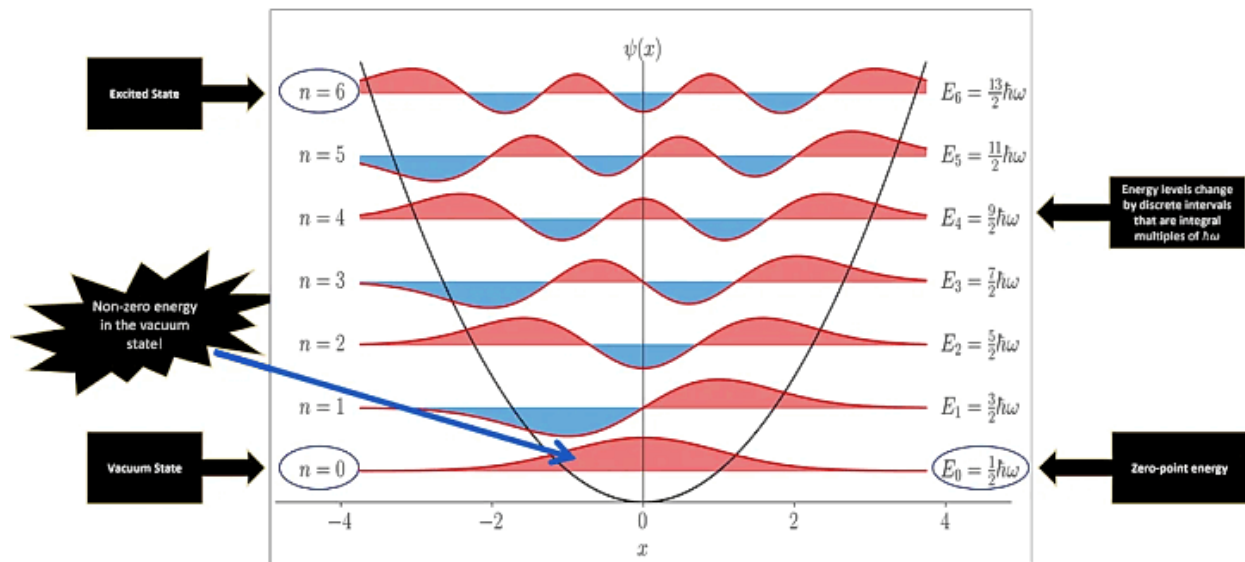


Abbildung 12. Die Nullpunktsenergie wurde 1911 von Max Planck bei seiner Erforschung der Thermodynamik materieller Oszillatoren entdeckt, die Energie absorbieren und emittieren. Max Planck fand heraus, dass Energie in quantisierten Mengen absorbiert und emittiert wird und dass selbst am theoretischen Nullpunkt der thermischen Anregung ein harmonischer Oszillator einen nicht verschwindenden Energiewert ungleich null beibehält, der als Nullpunktsenergie bezeichnet wird. In der Quantenfeldtheorie ist ein Teilchen kein isoliertes Objekt, sondern eine Anregung eines Feldes, das durch harmonische Oszillatoren an jedem Punkt im Raum quantisiert wird. Genau wie Max Planck es für materielle Oszillatoren beschrieben hat, haben die quantenharmonischen Oszillatoren, aus denen die den Raum durchdringenden Felder bestehen, einen nicht verschwindenden Nullpunkt-Energiewert ungleich null. Daher gibt es in den Quantenfeldern selbst im niedrigsten Energiezustand, dem sogenannten Grund- oder Vakuumzustand, ständig Energiefluktuationen. Diese konstitutiven Masse-Energie-Schwingungen des Vakuums werden daher als Quantenvakuumfluktuationen bezeichnet.

Entgegen der allgemein verbreiteten, aber dennoch falschen Auffassung entstehen Quantenvakuumfluktuationen nicht aus dem Heisenbergschen Unschärfeprinzip, sondern sind eine Folge der intrinsischen Nullpunktsenergie jedes Systems von quantenharmonischen Oszillatoren.

Dies zeigt sich bei der Lösung der Schrödingergleichung für den harmonischen Oszillator, bei der die Energieniveaus des Systems quantisiert und durch $\hbar\omega$ voneinander getrennt sind (wobei ω die Winkelgeschwindigkeit des Oszillators ist). Die Tatsache, dass diese Quantisierung $\hbar$ einschließt, unterstreicht, dass die Energie jedes Niveaus mit dem Drehimpuls verknüpft ist, was darauf hindeutet, dass die „Bewegung“ des Oszillators eher mit rotierenden oder zyklischen Prozessen als mit einer linearen Hin- und Herbewegung zusammenhängt.

Die spinartige Natur quantenharmonischer Oszillatoren

Obwohl es verlockend ist, sich den quantenharmonischen Oszillator als eine rein lineare Feder vorzustellen, ist dies letztlich keine hilfreiche Analogie, um den tatsächlichen physikalischen Zustand des Systems zu verstehen, in dem die Quantisierung in Einheiten von $\hbar$ eindeutig auf einen spinartigen oder rotatorischen Charakter impliziert. Jeder Quantenzustand hat eine spezifische „Phase“ – ein Konzept, das in der Quantenmechanik eng mit der Rotationsbewegung verknüpft ist. Darüber hinaus sind harmonische Oszillatoren in Quantenfeldern, wie etwa Photonen, mit Rotationssymmetrien und spinähnlichen Verhaltensweisen verbunden (Photonen selbst besitzen einen intrinsischen Drehimpuls, nämlich den Spin).

Die reduzierte Planck-Konstante $\hbar$ zeigt, dass der quantenharmonische Oszillator einen grundlegend winkelförmigen Charakter besitzt:

Die Quantisierung in diskreten Einheiten von $\hbar$ verbindet den Oszillator eher mit rotatorischen als mit linearen Eigenschaften (in Bezug auf Abbildung 11).

Die Bahnkurven im Phasenraum sind kreisförmig und spiegeln ein zyklisches oder rotatorisches Verhalten wider.

Die Phasenraumtrajektorien sind kreisförmig und spiegeln ein zyklisches oder rotatorisches Verhalten wider.

Die Leiteroperatoren im Formalismus des harmonischen Oszillators funktionieren als „Stufen“ in einem rotatorischen Bezugssystem (Abbildung 12).

Während die übliche Analogie den harmonischen Oszillator bevorzugt als lineare Feder darstellt, entspricht die aus physikalischer Sicht realistischere Situation eher der von rotierenden Kugeln anstelle kleiner Gewichte an Federn – wobei klar ist, dass er in der Quantenmechanik präziser als ein **System mit intrinsischen rotatorischen Eigenschaften** betrachtet wird (Abbildung 13). Diese winkelförmige Natur ist der Grund dafür, dass harmonische Oszillatoren in der Quantentheorie untrennbar mit Spin, Zyklen und Phase verbunden sind – Konzepte, die eng mit dem Drehimpuls verknüpft sind.

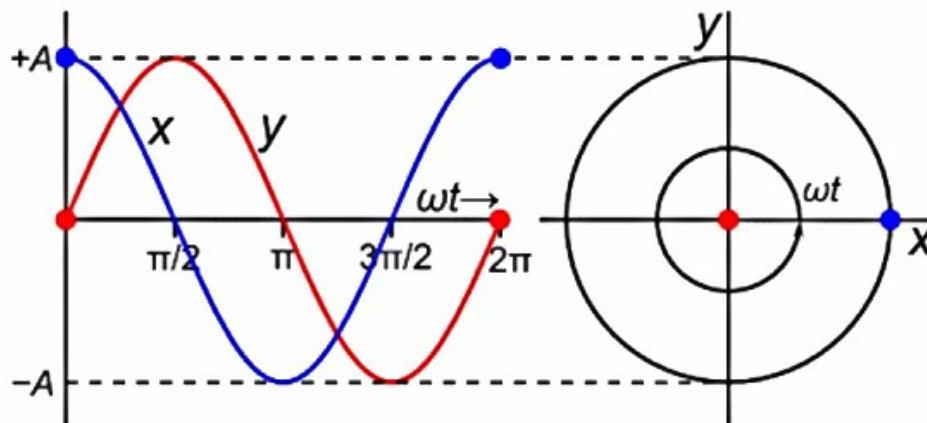
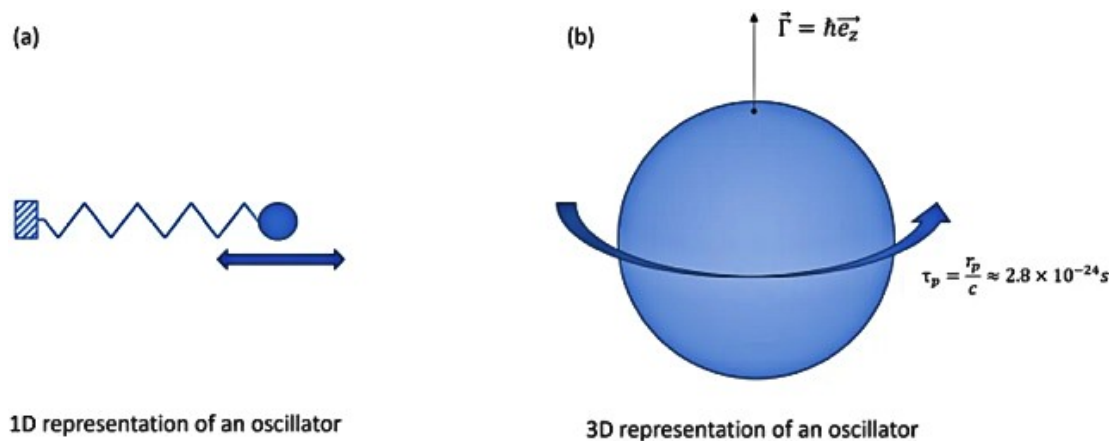


Abbildung 13. Der harmonische Oszillator ist für das Verständnis der Quantenmechanik und des Verhaltens von Absorbern und Emittlern, durch welche die Quanten und Quantenfelder gekennzeichnet sind, von zentraler Bedeutung. Obwohl der Oszillator typischerweise als linear schwingende Feder visualisiert wird (a), muss man bedenken, dass die Federanalogie eine eindimensionale Projektion einer dreidimensionalen Rotationsbewegung darstellt (b), wobei letztere eine realistischere und präzisere Visualisierung dessen bietet, was in den betrachteten realen physikalischen Resonatoren (z. B. Atomen) geschieht, etwa in einem Schwarzen Körper, der elektromagnetische Energie absorbiert und emittiert.

Einstein, Stern und Nernst: Die Entdeckung des Nullpunktfeldes (NPF)

Im Jahr 1906 definierte Einstein die Quanten der Strahlungsenergie, indem er das heuristische Argument vorbrachte, dass sich die Emission und Absorption durch die Planck-Oszillatoren (die von ihm angenommenen Resonatorhohlräume) in diskreten Intervallen vollzieht, welche ganzzahlige Vielfache von $\hbar\omega$ bilden (wie in Abbildung 11 dargestellt), womit er im Wesentlichen das Konzept des Photons

begründete („Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt“). Zu beachten ist dabei, dass [Einstein](#) und [Stern](#) die Notation der [reduzierten Planck-Konstanten](#) $\hbar$ verwendeten (die wir im vorherigen Abschnitt betrachtet haben) sowie für die [Frequenz](#) das Symbol Omega, bezeichnet durch den griechischen Buchstaben ω (wobei zu berücksichtigen ist, dass die beschriebenen [harmonischen Oszillatoren](#) [rotieren](#) und somit eine spezifische [Rotationsfrequenz](#) besitzen).

Diese Annahme der [Quantisierung](#) von [Emission](#) und [Absorption](#) bei diskreten [Energieniveaus](#), die nur ganzzahlige Vielfache von $\hbar\omega$ sind (im Wesentlichen die Definition des [Photons](#)), ermöglichte es Einstein, aus seinem aufgeklärten [photoelektrischen Effekt](#) konkrete Vorhersagen zu treffen. Dieser Effekt ist wichtig im Hinblick auf die Kopplung von [Materie](#) mit [Quantenvakuumfluktuationen](#) und [Nullpunktsenergie](#), die untrennbar mit der Absorption und Emission [elektromagnetischer Quanten](#) verbunden sind, wie beispielsweise beim [photoelektrischen Effekt](#) und der [spontanen Emission](#), wofür er 1921 den [Nobelpreis](#) erhielt.

Bei der Untersuchung der Eigenschaften von [Dipoloszillatoren](#) fügten [Einstein](#) und [Stern](#) der durchschnittlichen Energie eines Dipoloszillators (U) eine [Nullpunktsenergie](#) hinzu, sodass diese $U + \hbar\omega$ ergibt. Als sie diesen Nullpunktsenergiefaktor auf Dipoloszillatoren anwandten, konnten sie das [Planck-Spektrum](#) exakt reproduzieren (was seine Entdeckung weiter bestätigte). Diese Ergebnisse wurden 1913 in einem Artikel unter dem Titel „Einige Argumente für die Annahme einer molekularen Bewegung am absoluten Nullpunkt“^[25] publiziert.

Interessanterweise war der Wert der [Nullpunktsenergie](#) von [Einstein](#) und [Stern](#) doppelt so hoch wie der zuvor von [Planck](#) ermittelte. Dies liegt daran, dass die gesamte Nullpunktsenergie eines linearen Dipoloszillators mit einer [Frequenz](#) von ω , der mit einer [Feldmode](#) derselben Frequenz (wie etwa einer bestimmten [Wellenlänge](#) des [elektromagnetischen Feldes](#)) gekoppelt ist, $\frac{1}{2}\hbar\omega + \frac{1}{2}\hbar\omega = \hbar\omega$ beträgt, obwohl Einstein und Stern den Wert der [Nullpunktsenergie](#) von $\hbar\omega$ ausschließlich den *materiellen Dipoloszillatoren* zuschrieben. Im Wesentlichen bedeutet dies, dass Einstein und Stern, ohne es damals erkannt zu haben, die mit allen Schwingungen eines Feldes verbundene Nullpunktsenergie entdeckt hatten – das *Nullpunktfeld*. In ihrer Gleichung ist die Nullpunktsenergie eines Dipoloszillators $U + \frac{1}{2}\hbar\omega$ doppelt so hoch wie der von [Planck](#) abgeleitete Wert, weil die Nullpunktbewegung eines materiellen Dipoloszillators mit den Nullpunktschwingungen eines Quantenfeldes, wie dem elektromagnetischen Feld, gekoppelt ist.

Wir werden sehen, dass diese Nullpunktschwingungen des Grundzustandes des elektromagnetischen Feldes auch als [Quantenvakuumfluktuationen](#) bezeichnet werden – womit [Einstein](#) und [Stern](#), über die Arbeiten von [Planck](#), ebenfalls das [Quantenvakuum](#) entdeckt hatten. Um dies zu verdeutlichen, hat [Peter Milonni](#) – ein [theoretischer Physiker](#), der sich mit [Quantenoptik](#), [Laserphysik](#), [Quantenelektrodynamik](#) und dem [Casimir-Effekt](#) beschäftigt – im Rahmen der [Quantenmechanik](#) gezeigt, dass bei Betrachtungen des [thermodynamischen Gleichgewichtes](#) zwischen dem [elektromagnetischen Feld](#) und Dipoloszillatoren ein Dipoloszillator mit einem Nullpunktwert von $\hbar\omega$ – und nicht nur $\frac{1}{2}\hbar\omega$ – entsteht, weil aus Gründen der [Konsistenz](#) die [Fluktuations-Dissipations-Reaktion](#) eines [Strahlers](#) mit der [Nullpunktsenergie](#) des elektromagnetischen Feldes gekoppelt sein muss, sodass der gesamte Beitrag der Nullpunktsenergie $\frac{1}{2}\hbar\omega + \frac{1}{2}\hbar\omega = \hbar\omega$ beträgt.^[26]

Letztendlich zogen [Einstein](#) und [Stern](#) ihren 1913 veröffentlichten Artikel wieder zurück, da ihre Arbeit nahelegte, dass die [spezifische Wärme](#) – ein Maß für die Fähigkeit eines Materials, seine [Temperatur](#) mit einer gegebenen Energiemenge zu ändern – durch die [Nullpunktsenergie](#) bei extrem niedrigen Temperaturen unverändert bleibt, während experimentelle Daten zeigten, dass sie tatsächlich gegen null geht. Mit sinkender Temperatur nimmt die verfügbare [thermische Energie](#) in einem System ab, und bei sehr niedrigen Temperaturen befinden sich die meisten [Atome](#) oder [Teilchen](#) eines Materials in ihren niedrigsten [quantenmechanischen Energiezuständen](#). In diesem Zustand fehlt ihnen die thermische Energie, um zu höheren [Energieniveaus](#) zu wechseln, sodass sie „eingefroren“ an ihrem Platz verbleiben. Dieses Phänomen führt zum [Dritten Hauptsatz der Thermodynamik](#), der besagt, dass mit Annäherung der Temperatur an den [absoluten Nullpunkt](#) die [Entropie](#) eines Systems ein Minimum erreicht und die [spezifische Wärme](#) gegen null geht.

Da es sich bei der [Nullpunktsenergie](#) um die minimale Energie handelt, die die Teilchen weder abgeben noch verändern können, erzeugt sie keine zugänglichen Zustände, zwischen denen Teilchen wechseln könnten. Folglich ist keine zusätzliche Energie erforderlich, um das System auf einer geringfügig

unterschiedlichen Temperatur zu halten, was zu einer [spezifischen Wärme](#) führt, die gegen null geht. Die Nullpunktsenergie trägt zwar zur Gesamtenergie des Systems bei, jedoch nicht in einer Weise, die temperaturabhängige Eigenschaften wie die spezifische Wärme beeinflusst. Sobald ein System sein Nullpunktsenergie-Niveau erreicht hat, führt eine weitere Temperaturabsenkung nicht zu einer Verringerung dieser Energie. Daher bildet die Nullpunktsenergie eine Basislinie, die die Wärmekapazität nahe dem absoluten Nullpunkt nicht beeinflusst.

Weniger bekannte Zeitgenossen von Planck und Einstein, wie etwa [Walter Nernst](#) (Abbildung 14), bekannt als der Großvater des [Quantenvakuums](#) und der [Dunklen Energie](#)^[27], erweiterten die Entdeckung der Nullpunktsenergie mechanischer Oszillatoren materieller Systeme (z. B. [Atome](#)) auf [Quantenfelder](#) wie das [elektromagnetische Feld](#). Dies bedeutet, dass selbst in einem scheinbaren Vakuum, in dem keine beobachtbaren [Photonen](#) festgestellt werden können und das elektromagnetische Feld keine [Energie](#) haben sollte, im Feld eine [konstitutive](#) Nullpunktsenergie existiert. Daher ist der Raum von einem Nullpunktfeld durchdrungen, und es gibt ein wahres Meer von Energie, das allen Dingen zugrunde liegt. Dies bedeutet auch, dass die klassische Vorstellung von einem Vakuum – ein Raumvolumen, das scheinbar frei von Teilchen und Energie ist – kein physikalisch realer Zustand ist, der jemals erreicht werden kann. Somit wird die klassische Vorstellung eines hypothetischen Vakuums durch das physikalisch reale *Quantenvakuum* ersetzt, das aufgrund der Nullpunktsenergie im [Grundzustand](#) aller [Moden](#) des Feldes (mit einer extrem großen Anzahl von Moden bis hinunter zu Wellenlängen der [Planck-Länge](#) und entsprechenden Frequenzen) einen nicht verschwindenden Energiewert besitzt – im Gegensatz zu einem klassischen Vakuum.



Abbildung 14. Die Urheber der Nullpunktsenergie und des Nullpunktfeldes. Von links nach rechts: Walter Nernst, Albert Einstein und Max Planck.

Dies ist ein entscheidendes Merkmal der [Nullpunktsenergie](#) und des Beitrages der [Energie](#) der [Quantenvakuumfluktuationen](#) zu jedem [materiellen](#) System, denn ohne die Kopplung von Dipoloszillatoren, wie etwa den [Atomen](#), an das Nullpunktfeld würde der [Dipol](#) vollständig abstrahlen und kollabieren. Das bedeutet, dass die elektronischen [Orbitale von Atomen](#) gemäß der [stochastischen](#)

[Elektrodynamik](#) durch das umgebende Nullpunktfeld gestützt werden. Ohne [Nullpunktsenergie](#) und die Wechselwirkung mit dem Quantenvakuum gäbe es keine [stabile atomare Materie](#). [Einstein](#) griff die Arbeiten von [Nernst](#) zu der nicht verschwindenden [Energie](#) des elektromagnetischen Vakuums – aufgrund des wahren Meeres von Nullpunktsenergie, das den gesamten Raum durchdringt – auf, um in seiner [allgemeinen Relativitätstheorie](#) einen Beitrag der [Energiedichte](#) des [Quantenvakuums](#) zu einem [kosmologischen Konstantenterm](#) zu formulieren, welcher die [Gravitationskraft](#) ausgleichen würde. Die [kosmologische Konstante](#) gilt heute als Quelle der [beschleunigten Expansion des Universums](#) (siehe [Unruhs](#) Artikel [Wie die enorme Energie des Quantenvakuums die langsam beschleunigte Expansion des Universums antreibt](#)^[28]). Obwohl [Einstein](#) und [Stern](#) ihre früheren Arbeiten zur [Nullpunktsenergie](#) zurückgezogen hatten, kehrte Einstein zwangsläufig zur Idee eines Nullpunktfeldes zurück. Die Vorstellung, dass der Raum leer sei, welche ironischerweise zu Unrecht Einsteins [allgemeiner Relativitätstheorie](#) zugeschrieben wird, würde mit der Entdeckung des [Quantenvakuums](#) und des Nullpunktfeldes ein für alle Mal ausgeräumt werden. In gewisser Weise war dies eine Rückkehr zum [Äther](#), einer Theorie aus dem 19. Jahrhundert, nach der der Raum von einem substanziellen Medium durchdrungen ist, durch das sich [Lichtwellen](#) ausbreiten, wobei Einstein 1920 erklärte:

Anderseits läßt sich aber zugunsten der Ätherhypothese ein wichtiges Argument anführen. Den Äther leugnen, bedeutet letzten Endes annehmen, daß dem leeren Raume keinerlei physikalische Eigenschaften zukommen. Mit dieser Auffassung stehen die fundamentalen Tatsachen der Mechanik nicht im Einklang. ... Nach der allgemeinen Relativitätstheorie ist der Raum mit physikalischen Qualitäten ausgestattet; es existiert also in diesem Sinne ein Äther. Gemäß der allgemeinen Relativitätstheorie ist ein Raum ohne Äther undenkbar; denn in einem solchen gäbe es nicht nur keine Lichtfortpflanzung, sondern auch keine Existenzmöglichkeit von Maßstäben und Uhren, also auch keine räumlich-zeitlichen Entfernungen im Sinne der Physik. Dieser Äther darf aber nicht mit der für ponderable Medien charakteristischen Eigenschaft ausgestattet gedacht werden, aus durch die Zeit verfolgbaren Teilen zu bestehen; der Bewegungsbegriff darf auf ihn nicht angewendet werden.
[Einstein, Albert \(1920\)](#)^[29]

Viele dürften überrascht sein, [Einstein](#) im Zusammenhang mit dem Nullpunktfeld so direkt über den [Äther](#) sprechen zu hören, wobei er unmissverständlich feststellt, dass der [Raum](#) ein greifbares Medium besitzen müsse, weil er physikalische Eigenschaften hat – und eine nicht verschwindende [Energie](#) aufweisen muss. Doch auch moderne [Nobelpreisträger für Physik](#) wie [Frank Wilczek](#) sind in diesem Punkt sehr deutlich: siehe Wilczeks Vortrag über die [Materialität des Vakuums](#). Frank Wilczek spricht klar über die Tatsache der Materialität des Vakuums – die nicht verschwindende [Energiedichte](#), die aus der [Nullpunktsenergie](#) des [Quantenfeldes](#) resultiert –, weil er weiß, dass sie in den aktuellen Formulierungen der [Quantenelektrodynamik](#) (QED) und [Quantenchromodynamik](#) (QCD) ein wesentlicher und unauslöschlicher Bestandteil ist.

Beispielsweise ist in der [Quantenelektrodynamik](#) die [elektromagnetische Energiedichte](#) des [Quantenvakuums](#) entscheidend für die Behandlung der [nackten Masse](#) (oder der bloßen Masse – die Masse eines [Teilchens](#), bevor es mit [virtuellen Teilchenpaaren](#) des Quantenvakuums „bekleidet“ wird) sowie der nackten Ladung von Elementarteilchen. Dies liegt daran, dass [Elementarteilchen](#) im [Standardmodell](#) punktförmig sind (im wahrsten Sinne des Wortes als eindimensionale Objekte verstanden), sodass „unbekleidete“ Werte unendliche [Masse](#) und [Ladung](#) ergeben. Die nicht verschwindende Energie des Vakuumzustandes des QCD-Vakuums, welches die [Farbkraft](#) und die [nukleare Bindungsenergie](#) im [Standardmodell](#) behandelt, ist das, was [Hadronen](#) ihre Masse verleiht. Dies liegt daran, dass nur etwa 1 bis 5 Prozent durch den [Higgs-Mechanismus](#), der auf die [Quarks](#) wirkt, erklärt werden können, und der Rest vermutlich aus der [Bindungsenergie der Farbkraft](#) stammt, welche aus dem [Quark-Gluon-Kondensat](#) des [QCD-Vakuums](#) resultiert.

Die Bedeutung dieser Entdeckung der [Nullpunktsenergie](#) durch [Einstein](#), [Planck](#) und andere für die [Quantentheorie](#) kann also gar nicht hoch genug eingeschätzt werden. Trotz ihrer Rolle als Begründer der Nullpunktsenergie haben weder Planck noch Einstein und [Stern](#) jemals vermutet, dass es ein Nullpunktfeld geben könnte – und wie wir gesehen haben, geht die erste Erörterung dieser Möglichkeit auf [Walther Nernst](#) im Jahr 1916 zurück.^[30] Dennoch bilden die frühen Ableitungen von Planck, Einstein und Nernst zur Wechselwirkung zwischen [Licht](#) und [Materie](#), aus der sich die Dichte der Nullpunktsenergie ergibt, die Grundlage der [Quantenmechanik](#).

Die [Quantenmechanik](#) wurde bald erweitert, um alle [Teilchen](#), darunter [Bosonen](#) (wie etwa [Photonen](#)) und [Fermionen](#) (wie etwa [Elektronen](#)), als feldartig zu beschreiben, wobei es sich bei den sogenannten „Teilchen“ lediglich um [Anregungen](#) der [quantenharmonischen Oszillatoren](#) in einem eingegrenzten

Bereich jenes Feldes handelt, das den gesamten Raum ausfüllt. Entscheidend ist, dass alle diese quantenharmonischen Oszillatoren, die jeden Punkt des Raumes im gesamten Feld ausfüllen, im [Vakuumzustand](#) diese [Fluktuationen](#) der [Nullpunktsenergie](#) aufweisen, und sich daraus das Quantenvakuum bildet. Diese allgegenwärtige fluktuierende Nullpunktsenergie des Quantenvakuums ist ein wesentlicher Bestandteil der Quantenmechanik und ihrer Formalismen sowie der [Kosmologie](#) bei der Erklärung des Phänomens der [Dunklen Energie](#), welche mit der [beschleunigten Expansion des Universums](#) verbunden ist.^[31]

Die Grundlagen der Quantenmechanik als auch die Unschärferelation sind fest in der Dynamik der Vakuumfluktuationen der Nullpunktsenergie verwurzelt

In der [Quantenfeldtheorie](#) (QFT) wird das [elektromagnetische Feld](#) als ein Quantenfeld beschrieben, das in diskreten [Quanten](#), den sogenannten [Photonen](#), existieren kann. Das Feld ist [quantisiert](#), was bedeutet, dass jede mögliche [Mode](#) (und jede [Frequenz](#)) des Feldes als [quantenharmonischer Oszillator](#) beschrieben werden kann, dessen [Energieniveaus](#), wie in Abbildung 6 gezeigt, Vielfache der [reduzierten Planck-Konstanten](#) $\hbar$ und der Frequenz des Feldes ω sind.

In der [klassischen Elektrodynamik](#) wird das [elektromagnetische Feld](#) durch [oszillierende](#) elektrische und magnetische Feldkomponenten dargestellt. In der [Quantenfeldtheorie](#) hingegen wird jede [Mode](#) des elektromagnetischen Feldes, die einer bestimmten [Frequenz](#) und [Wellenlänge](#) entspricht, [quantisiert](#) und als unabhängiger [quantenharmonischer Oszillator](#) behandelt.

Das [quantisierte elektromagnetische Feld](#) kann als Summe all dieser [oszillierenden Moden](#) ausgedrückt werden. Für jede Mode gibt es [Erzeugungs- und Vernichtungsoperatoren](#), $\hat{a}$ und $\hat{a}^\dagger$ (in der [Quantenmechanik](#) ist ein Operator ein mathematisches Werkzeug, das auf eine Funktion oder einen Zustand „einwirkt“, um eine andere Funktion oder einen anderen Zustand zu erzeugen – üblicherweise verbunden mit der Messung einer bestimmten physikalischen Größe wie etwa Ort, [Impuls](#) oder Energie). Die Erzeugungs- und Vernichtungsoperatoren, die Teil des [Energieoperators](#) sind, welcher uns über die Energie des Systems informiert, fügen dem Feld [Quanten](#) (z. B. [Photonen](#)) hinzu oder entfernen sie aus diesem. Diese [quantisierte](#) Struktur erlaubt es uns, das Feld als aus diskreten Photonenanregungen bestehend zu betrachten, anstatt als eine kontinuierliche Welle, d. h. als aus virtuellen Photonen bestehend – jedoch darf der Begriff „virtuell“ hier nicht als „nicht real“ missverstanden werden, denn diese virtuellen Photonen haben reale messbare Effekte, die wesentlicher Bestandteil der Eigenschaften und Verhaltensweisen von Teilchen sind.

In der [Quantenfeldtheorie](#) gibt es etwas, das als „[Hamiltonian](#)“ (Hamiltonoperator) bezeichnet wird – den wir gerade als [Energieoperator](#) kennengelernt haben und der der Gesamtenergie eines betrachteten Systems entspricht. Machen Sie sich keine Gedanken darüber, was dies genau bedeutet, denn wir werden nur einige Teile davon untersuchen, um die Bedeutung der [Nullpunktsenergie](#) in der [Quantenmechanik](#) zu verdeutlichen, die so oft falsch dargestellt wird – beispielsweise durch die einfache Behauptung, die Nullpunktsenergie entstehe aus der [Heisenbergschen Unschärferelation](#). Der [Hamiltonoperator](#) für jede [Mode](#) des quantisierten Feldes ist gegeben durch:

$$\hat{H} = \hbar \omega \left(\hat{a}^\dagger \hat{a} + \frac{1}{2} \right)$$

wobei $\hat{a}^\dagger \hat{a}$ der [Zahloperator](#) ist, der die Anzahl der [Photonen](#) in dieser [Mode](#) darstellt, und der Term $\frac{1}{2} \hbar \omega$ die [Nullpunktsenergie](#) repräsentiert. Die Nullpunktsenergie einer Mode ist die Energie, die selbst dann existiert, wenn keine Photonen in dieser Mode vorhanden sind – denken Sie daran, dass „Mode“ nur ein Begriff ist, der das oszillierende Verhalten des harmonischen Oszillators beschreibt, z. B. seine Frequenz. Diese ergibt sich daraus, dass der [quantenharmonische Oszillator](#) ein minimales [Energieniveau](#), den [Grundzustand](#), von $\frac{1}{2} \hbar \omega$ anstatt null besitzt, was, wie wir gesehen haben, erstmals von [Planck](#) herausgearbeitet wurde. Somit legt *Plancks Nullpunktsenergie-Term* auf direkte Weise fest, dass das Feld nicht exakt null Energie aufweisen kann, da die elektrischen und magnetischen Feldkomponenten einige minimale Fluktuationen beibehalten müssen.

Im Kontext des gesamten [elektromagnetischen Feldes](#) trägt jede [Mode](#) des Feldes über alle Frequenzen hinweg mit einer [Nullpunktsenergie](#) von $\frac{1}{2} \hbar \omega$ bei. Da es unendlich viele Moden im Feld gibt – entsprechend mit allen möglichen Frequenzen –, ist die gesamte Nullpunktsenergie des elektromagnetischen Feldes formal unendlich. Bezeichnet wird diese Energie als die Vakuumenergie des Feldes.

Fluktuationen des Vakuumzustandes, Nullpunktsenergie und Nichtkommutativität

Der [Vakuumzustand](#) des [elektromagnetischen Feldes](#) ist der Zustand ohne [Photonen](#), d. h. alle [Moden](#) befinden sich in ihrem [Grundzustand](#). Aufgrund der [Nullpunktsenergie](#) in jeder Mode ist das [Vakuum](#) jedoch nicht wirklich leer, sondern zeichnet sich durch konstante [Fluktuationen](#) aus, die aus der Nullpunktsenergie resultieren. Obwohl diese von null verschiedene [Energiedichte](#) des [Vakuumzustandes](#) in den Berechnungen der [Quantenmechanik](#) und der [Quantenfeldtheorie](#) oft [entfernt](#) wird, bedeutet dies nicht, dass die Nullpunktsenergie aus dem System verschwindet. Tatsächlich resultiert der von null verschiedene Wert des Vakuumzustandes des [quantisierten elektromagnetischen Feldes](#) aus der [nichtkommutativen](#) Beziehung der [Erzeugungs- und Vernichtungsoperatoren](#) $\hat{a}^\dagger \hat{a}$.

Dies ist nicht [trivial](#), da die [konjugierten Variablen](#) der [Erzeugungs- und Vernichtungsoperatoren](#) für die [quantenharmonischen Oszillatoren](#) des [elektromagnetischen Feldes](#) für die mathematische [Konsistenz](#) der [Quantentheorie](#) wesentlich sind. Ohne sie würden Berechnungen, die [Operatoren](#) wie [Ort](#) und [Impuls](#) eines Teilchens betreffen, keine korrekten Ergebnisse liefern – wenn die Reihenfolge der Operationen nicht berücksichtigt, dass eine Ortsmessung die Präzision einer Impulsmessung verändert, führt die Missachtung ihrer [Nichtkommutativität](#) zu fehlerhaften Modellen. Um die Bedeutung dessen zu verstehen, müssen wir zunächst klären, was ein „nichtkommutativer Operator“ ist – und daraus wird viel klarer, wie diese mathematische Operation über die [Nullpunktsenergie](#) die Konsistenz in der Quantenmechanik aufrechterhält.

Die [Nichtkommutativität](#) in der [Quantenmechanik](#) bezieht sich auf die Eigenschaft, dass bestimmte physikalische [Observablen](#), wie die zuvor erwähnten [Ort](#) und [Impuls](#) oder [Drehimpuls](#), bei [mathematischen Operationen](#) nicht ohne Konsequenzen vertauscht werden können. Mit anderen Worten: Die Reihenfolge, in der diese Observablen gemessen oder mit ihnen Operationen durchgeführt werden, kann das Ergebnis beeinflussen und zu nichtkommutativem Verhalten führen, was bedeutet, dass die Reihenfolge der Operationen von Bedeutung ist.

Ein besonders hervorstechender Faktor bei der Betrachtung [nichtkommutativer Operationen](#) besteht in der Nichtkommutativität von [Absorptions-](#) und [Emissionsprozessen](#) – man erinnere sich daran, dass die gesamte Grundlage der [Quantenmechanik](#) mit der Aufklärung der Prozesse der Absorption und Emission von [Energiequanten](#) begann. Beispielsweise macht das [Dipolmodell](#) eines Atoms deutlich, dass das System aufgrund der [Strahlungsdämpfung](#) ohne die [Nullpunktsenergie](#) kollabieren würde. Die zentrale Gleichung, die dieses System beschreibt, umfasst sowohl eine Beschreibung des Strahlungsprozesses des Dipoloszillators, also des [Atoms](#), als auch einen [Quellterm](#) der Nullpunktsenergie. Entscheidend ist, dass ohne diesen Quellterm der Nullpunktsenergie die Lösung einen raschen Kollaps der Dipollänge vorhersagt. Wird die Nullpunktsenergie jedoch als Quellterm mit einbezogen, bleibt die Lösung stabil und bewahrt vor allem die nichtkommutative Beziehung $[\hat{x}, \hat{p}] = i\hbar$, die für die Quantenmechanik von grundlegender Bedeutung ist.

Wenn wir zu unserem Beispiel eines linearen Federoszillators zurückkehren, können wir uns vorstellen, dass das [Gewicht](#) an der [Feder](#) angeregt wird und [schwingt](#), wobei es langsam [kinetische Energie](#) verliert ([Dämpfung](#)) und die Schwingung schließlich aufhört. Die [Nullpunktsenergie](#) wirkt jedoch wie eine Hand, die das Gewicht ständig „anschiebt“ (mit einer [Resonanzfrequenz](#)) und so die Schwingung dauerhaft aufrechterhält. So funktionieren die [Atome](#) und die [quantenharmonischen Oszillatoren](#) der Nullpunktsenergie in der [Natur](#)! In Bezug auf die [Nichtkommutativität von Operatoren](#) wie der [Absorption](#) und der [Emission](#) oder des [Ortes](#) und des [Impulses](#) entsteht – entgegen der häufig geäußerten, aber dennoch falschen Fehlannahme – die [Heisenbergsche Unschärferelation](#) aus den [Vakuumfluktuationen](#) der [Nullpunktsenergie](#) und nicht umgekehrt.

Wie wir bei [Milonnis](#) Analyse der Bedeutung der [Nullpunktsenergie](#) für moderne [quantenmechanische](#) Formalismen gesehen haben, würde ohne den [konstitutiven](#) Beitrag der Nullpunktsenergie ein Dipoloszillator wie das Atom – diese negativ geladene [Elektronenwolke](#), die um den positiv geladenen [Kern](#) rotiert – schnell alle Energie [dissipieren](#) und kollabieren.^[32] Somit ist die Nullpunktsenergie ein für die Stabilität der [Materie](#) notwendiger Quellterm, der die strahlungsbedingte [Dämpfung](#) des [Dipols](#) ausgleicht – eine Situation, die dem klassischen [Elektron](#) ähnelt, das sich in kontinuierlicher [Beschleunigung](#) in seiner [Umlaufbahn](#) befindet, dabei seine gesamte [Energie](#) abstrahlt und in den [Kern](#) stürzt. Daher kann die Nullpunktsenergie zwar mathematisch aus dem [Hamiltonoperator](#) (der Summe aus [kinetischer](#) und [potenzieller Energie](#) eines [Quantensystems](#)) entfernt werden, wie es in der gängigen Praxis geschieht, in Wirklichkeit kann sie jedoch niemals vollständig aus dem System verschwinden, ohne dass es zu einem völligen Zusammenbruch kommt. Das Ergebnis ist, dass jegliche [Materie](#) und [Teilchen](#) im Allgemeinen nicht länger als ein Millionstel einer [Attosekunde](#) ($1 \text{ as} = 10^{-18} \text{ s} = 1 / 1\,000\,000\,000\,000\,000\,000 \text{ s} = 1 \text{ Trillionstel einer Sekunde}$) nach dem [Urknall](#) hätten existieren können.

Dieses Verfahren, die [Dichte](#) der [Nullpunktsenergie](#) mathematisch aus dem [Hamiltonoperator](#) eines Systems zu entfernen oder ihre [Divergenz](#) zu begrenzen – da die Summe aller [Moden](#) der [Quantenvakuumfluktuationen](#) zu einer unendlichen [Energiedichte](#) für den [Vakuumerwartungswert](#) (VEV) führt – wird als „[Renormierung](#)“ bezeichnet. Während viele Theoretiker mit der Anwendung der Renormierung zur Lösung verschiedener Divergenzprobleme (Ergebnisse, die gegen unendlich gehen) völlig zufrieden sind, konnten die Versuche, die durch die Nullpunktsenergie in der [Quantenmechanik](#) verursachten Divergenzprobleme (die zu einer Vorhersage einer unendlichen Energiedichte für den VEV führen) zu lösen und gleichzeitig die Nullpunktsenergie zur Definition der fundamentalen Felder von Teilchen und Kräften zu nutzen, durch den Renormierungsprozess zu keiner erfolgreichen Lösung geführt werden. Dies führte wiederum zu sehr deutlichen Aussagen einiger der Begründer der Quantenmechanik:

Paul Dirac: *Die meisten [Physiker](#) sind mit der Situation sehr zufrieden. Sie sagen: „Die [Quantenelektrodynamik](#) ist eine gute Theorie, und wir müssen uns darüber keine Gedanken mehr machen.“ Ich muss sagen, dass ich mit der Situation sehr unzufrieden bin, denn diese sogenannte „gute Theorie“ beinhaltet die Vernachlässigung von [Unendlichkeiten](#), die in ihren [Gleichungen](#) auftreten, und ignoriert sie auf willkürliche Weise. Das ist einfach keine vernünftige [Mathematik](#). Vernünftige Mathematik bedeutet, eine [Größe](#) zu vernachlässigen, wenn sie klein ist – und nicht, sie zu ignorieren, nur weil sie unendlich groß ist und man sie nicht haben will! Dirac, 1975.^[33]*

Richard Feynman: *Das Spiel, das wir spielen, wird technisch als „[Renormierung](#)“ bezeichnet. Aber egal, wie schlau das Wort auch sein mag, es bleibt für mich ein [narrisches](#) Verfahren! Der Rückgriff auf solchen [Hokuspokus](#) hat uns daran gehindert, zu beweisen, dass die Theorie der [Quantenelektrodynamik](#) mathematisch in sich stimmig ist. Es ist überraschend, dass die Theorie bis heute nicht auf die eine oder andere Weise als in sich stimmig bewiesen wurde – ich vermute, dass die Renormierung mathematisch nicht [legitim](#) ist. Feynman, 1985.^[34]*

Obwohl ein [Vakuumerwartungswert](#) mit einer [unendlichen](#) Dichte der [Nullpunktsenergie](#) zunächst als nichtphysikalisches Ergebnis erscheinen mag, gibt es theoretische wie auch beobachtungsbasierte Gründe für die Annahme, dass der [Vakuumzustand](#) tatsächlich eine extrem hohe [Dichte](#) der Nullpunktsenergie aufweist. In der Tat resultiert diese Erkenntnis aus einer Reihe verschiedener Überlegungen: Wenn man beispielsweise [Einsteins](#) Aussage ernst nimmt, nach der die [Raumzeit](#) eine substantielle Natur haben muss, was mit der frühen Vorstellung vom [Äther](#) übereinstimmt, können wir allein durch Überlegungen darüber, was eine substantielle Materialität des [Vakuums](#) bedeuten würde, eine enorme „latente“ [Energiedichte](#) erkennen. Bereits 1907 hatte [Oliver Lodge](#) Werte für die Dichte des Äthers berechnet – wobei das [Quantenvakuum](#) ein umgewandelter Äther ist – von 10^{26} J/cm^3 oder (nach der [Äquivalenz](#) $E = m \cdot c^2$) 10 000 [Tonnen](#) pro cm^3 .^[35] Er beschrieb die Energiedichte des Raumes wie folgt: „Dies entspricht einer Energie von $3 \times 10^{17} \text{ kWh}$ oder der Gesamtleistung eines [Millionen-Kilowatt-Kraftwerkes](#) über einen Zeitraum von 30 Millionen Jahren, die [permanent](#) und derzeit unzugänglich in jedem [Kubikmillimeter](#) des Raumes vorhanden ist.“^[36] Hinsichtlich der extrem hohen Werte der Energiedichte, die von ihm berechnet wurden – und angesichts der frühen und begrenzten Vorstellungen von der Natur des [Feldes](#) –, bemerkte Lodge weiter:

Es gibt nichts [Paradoxes](#), und soweit ich das beurteilen kann, nichts Unwahrscheinliches an diesen Zahlen ... und die [Trägheit](#) [d. h. die Masse] der Materie muss ein bloßer Restanteil der Trägheit der kontinuierlichen, [inkompressiblen komplexen](#) Flüssigkeit sein, aus der sie hypothetisch besteht und in der sie sich bewegt.

[Lodges](#) Berechnung der [Energiedichte](#) des freien Raumes basierte auf den damals vermuteten Eigenschaften des allgegenwärtigen [Äthermediums](#) und den ätherischen Konstanten der [magnetischen Permeabilität](#) und der [elektrischen Induktivität](#) des freien Raumes. Es ist daher interessant zu sehen, dass seine berechnete, scheinbar extrem hohe Energiedichte immer noch etwa 10^{87} mal kleiner ausfiel als heutige Berechnungen des [Vakuumerwartungswertes](#), bei denen die [Planck-Länge](#) als Grenzwert für zulässige [Feldmoden](#) des Nullpunktennergiefeldes verwendet wird. Da die beiden Hauptsäulen der Grundlagenphysik besagen, dass es eine von null verschiedene Energiedichte des [Vakuums](#) gibt – in Form der [kosmologischen Konstante](#) in der [allgemeinen Relativitätstheorie](#) und des [Vakuumerwartungswertes](#) in der [Quantenfeldtheorie](#) –, lässt sich daraus die Überlegung anstellen, welchen Einfluss diese allgegenwärtige [Nullpunktsenergie](#) auf die [Krümmung der Raumzeit](#) hat – eine Überlegung zur Vereinheitlichung der fundamentalen physikalischen Theorien und zur quantenmechanischen Beschreibung der Gravitation.

Quantengeometrodynamik und Raumzeitschaum

Von der Entdeckung der [Nullpunktsenergie](#) durch [Max Planck](#) zur Entwicklung einer optimal [effizienten Glühbirne](#) (deren optimale [Temperatur](#) noch heute, mehr als hundert Jahre nach Plancks Untersuchung, genutzt wird) und ihrer grundlegenden Rolle in der anschließenden Entwicklung der [Quantentheorie](#) – z. B. zur Erklärung, warum der strahlende [Dipol](#) eines Atoms nicht spontan [kollabiert](#) – bis hin zu ihrer Anwendung in der [Quantenfeldtheorie](#), wo sie zur Vorhersage einer enormen [Energiedichte](#) des [Quantenvakuums](#) führt, können wir ihren Fortschritt bis hin zur [vereinheitlichten Physik](#) verfolgen, in der die [Quantenvakuumfluktuationen](#) der [Nullpunktsenergie](#) erhebliche Auswirkungen auf die [Geometrie](#) der [Raumzeit](#) haben. Um die Auswirkungen auf das [Gravitationsfeld](#) und die Raumzeitstruktur zu verstehen, die mit [Energiedichtewerten](#) verbunden sind, die sich aus einer von null verschiedenen [Vakuumentnergie](#) (d. h. Nullpunktsenergie) ergeben, können wir zunächst die Arbeiten von [Charles Misner](#) und [John Archibald Wheeler](#) in der frühen [einheitlichen Feldtheorie](#) betrachten.

Da [Einsteins](#) Gleichungen der [allgemeinen Relativitätstheorie](#) zeigen, dass alle [Energiequellen](#) die [Raumzeit geometrisieren](#) und es sich bei der gekrümmten Raumzeitgeometrie um die [Gravitation](#) handelt, sollte der [Vakuumerwartungswert](#) der [Energiedichte](#) der [Nullpunktsenergie](#) zu einer stark gekrümmten Raumzeit und zu einer intensiven [gravitativen](#) Wirkung führen. Dies steht scheinbar im Widerspruch zum Erwartungswert der Vakuumenergie in der [Kosmologie](#), der eine Energiedichte des Raumes in der Größenordnung von 10^{-9} J/m^3 vorhersagt, was eine nahezu flache Raumzeitkrümmung und möglicherweise sogar eine abstoßende Gravitationskraft ergibt, die eng mit dem Konzept der [Dunklen Energie](#) oder der [Quintessenz](#) verbunden ist, von der angenommen wird, dass sie die beschleunigte [Expansion des Universums](#) antreibt.

Der vergleichsweise winzige Wert der Vakuumenergie in der Kosmologie (der kleine Wert der kosmologischen Konstanten) steht in erheblichem Widerspruch zu dem viel größeren theoretischen Wert der Energiedichte der Nullpunktsenergie des Quantenvakuums, der von der Quantenfeldtheorie vorhergesagt wird – eine Diskrepanz in den Vorhersagen zwischen der Quantenelektrodynamik und der Kosmologie hinsichtlich der Energiedichte des Vakuums – bekannt als [Vakuummkatastrophe](#) oder kosmologisches Konstantenproblem (siehe dazu die Studie von Hameed und Bakers: [Die Lösung der Vakuummkatastrophe](#)^[37]). Die Charakterisierung des [Universums](#) im [Standardmodell der Kosmologie](#) als flach ist jedoch wahrscheinlich falsch, da neuere Erkenntnisse auf eine [gekrümmte Geometrie des Universums](#) im größten Maßstab hindeuten^[38] und im Mikrobereich die Feinstruktur der Raumzeitgeometrie stark gekrümmt ist (in einer mehrfach zusammenhängenden Geometrie, einer nichttrivialen komplexen Topologie von Mikrowurmlöchern). Nirgendwo wird dies besser veranschaulicht als in [Wheeler's Postulat](#) des [Quantenraumzeitschaums](#).

[Wheeler](#) und [Charles Misner](#) hatten bereits die Einstein-Maxwell-[Geometrodynamik](#) verwendet, um zu beschreiben, wie [Gravitation](#), [Elektromagnetismus](#), [Ladung](#) und [Masse](#) (die von Wheeler und Misner bereits [vereinheitlichte Feldtheorie](#)) aus [gekrümmtem Raum](#) mit einer mehrfach zusammenhängenden Topologie entstehen – eine [einfach zusammenhängende Topologie](#) ist wie eine glatte, kontinuierliche Oberfläche; Wheeler beschrieb, wie der Raum auf der fundamentalen Skala eine komplexe Topologie

aufweist, die aus brückenartigen Strukturen besteht, besser bekannt als [Wurmlöcher](#), und daher nicht glatt und kontinuierlich ist.^[39] Bei der [Quantisierung](#) der [Relativitätstheorie](#) in die [Quantengeometrodynamik](#) zeigte [Wheeler](#) dann, dass das [Gravitationsfeld](#) [konstitutive Fluktuationen](#) auf der Skala von $(\hbar G/c^3)^{1/2} = 1,6 \times 10^{-35} \text{ m}$ (der [Planck-Skala](#)) mit [Energien](#) in der Größenordnung von $(\hbar c^5/G)^{1/2} = 2,18 \times 10^{-5} \text{ g}$ aufweisen würde.^[40]

Die Größenordnung dieses [Radius](#) und dieser [Masse-Energie](#) entspricht der [Schwarzschild-Lösung](#), bei der es sich um eine [Wurmlochmetrik](#) handelt. Insgesamt weisen die [Fluktuationen](#) der Masse-Energie des [Gravitationsfeldes](#) auf der [Planck-Skala](#) ($\sim 10^{-35} \text{ m}$) stark gekrümmte Geometrien und die mehrfach zusammenhängende Topologie einer [Einstein-Rosen-Brücke](#) auf, die [Wheeler](#) als [Quantenraumzeitschaum](#) bezeichnete – ein dynamisch fluktuierendes Netzwerk von Mikrowurmlöchern auf der [Planck-Skala](#), das durch die extrem hohe [Energiedichte](#) des [Quantenvakuums](#) auf der Mikroskala erzeugt wird. Beachten Sie, dass diese mehrfach zusammenhängende Geometrie der Raumzeit, die aus [Nullpunktsenergie](#) und [Quantenvakuumfluktuationen](#) entsteht, das [Informationsverlustparadoxon](#) löst (siehe dazu unseren Artikel [Ein ereignisreicher Horizont](#)) sowie die „spukhafte Fernwirkung“ der Einstein-Podolsky-Rosen-Korrelation, auch bekannt als [Quantenverschränkung](#), durch die Äquivalenz mit [Einstein-Rosen-Brücken](#) (siehe dazu unseren Artikel [Ein Protokoll für die Teleportation in durchquerbaren Wurmlöchern](#)).

Hier sehen wir die ersten Schritte hin zu einer Vereinigung der [Nullpunktsenergie](#) mit der Raumzeitgeometrie, was [Wheeler](#) dazu brachte, [Elementarteilchen](#) als selbsttragende Energiestrukturen zu beschreiben, die vollständig durch die [Krümmung der Raumzeit](#) selbst geformt werden, die er als „[Geonen](#)“ bezeichnete und damit eine rein geometrische und feldbasierte Beschreibung von Teilchen lieferte. Ein **Geon** (kurz für „gravitational-electromagnetic entity“, also „gravitationselektromagnetische Einheit“) ist eine lokalisierte, stabile Konfiguration von [Gravitations-](#) und [elektromagnetischen Feldern](#). Statt als fundamentale Teilchen entstehen sie als **Krümmungen oder „Blasen“ der Raumzeit** – geformt durch Energie, insbesondere durch die Energie aus Gravitations- und elektromagnetischen Feldern.

Das [Geon](#)-Konzept baut auf [Einsteins](#) Idee auf, dass [Masse](#) und [Energie](#) die [Raumzeit krümmen](#) können, geht jedoch weiter und legt nahe, dass [Elementarteilchen](#) vollständig durch diese Krümmung beschrieben werden könnten, ohne dass sie eine zugrunde liegende „Substanz“ benötigen, wie sie Teilchen normalerweise zugeschrieben wird. [Wheeler](#) schlug daher vor, dass **selbsttragende Strukturen aus der Nullpunktsenergie und die Raumzeitkrümmung** die Grundlage aller [Materie](#) bilden, da die [intrinsische](#) Nullpunktsenergie des [elektromagnetischen Feldes](#) mit der Raumzeit in einer Weise interagieren könnte, dass sie sich selbst „einfängt“ und einen in sich geschlossenen Bereich intensiver Energie schafft. Wheeler stellte sich vor, dass die zur Aufrechterhaltung dieser Struktur erforderliche Energie aus der Nullpunktsenergie stammen könnte, die eine natürliche Quelle für [Fluktuationen](#) und die [Energiedichte](#) im [Vakuum](#) darstellt: eine Bedingung, die in neueren Arbeiten erstmals rigoros und analytisch nachgewiesen wurde.

Der [Quantenraumzeitschaum](#) stellt nach wie vor ein grundlegendes [Postulat](#) in der [Quantengravitation](#) dar. Daraus lässt sich ableiten, dass es eine feinstrukturierte, [diskretisierte](#), stark gekrümmte Geometrie des Raumes gibt, die auf die [Energiedichte](#) der [Nullpunktsenergie](#) zurückzuführen ist. Die extrem hohe Energie des [Vakuumerwartungswertes](#) aus der [Quantenfeldtheorie](#) steht dabei nicht im Widerspruch dazu – diese extrem hohe Energie krümmt den Raum auf der [Planck-Skala](#) in eine mehrfach zusammenhängende [Einstein-Rosen-Brücken](#)-Topologie. Daher sehen wir, dass die [Vakuumentnergie](#) der [Nullpunktsfluktuationen](#) mit einer mikroskaligen, diskretisierten Raumzeitgeometrie, dem [Quantenschaum](#), verbunden ist, einem Schlüsselement der [Quantengravitation](#).

Bezeichnenderweise erkennen wir in der [Quantengeometrodynamik](#) und in dem Konzept des [Quantenraumzeitschaums](#), dass sowohl die [Nullpunktsenergie](#) als auch die [Vakuumfluktuationen](#) die Bildung von [Schwarzen Löchern](#) auf der [Planck-Skala](#) antreiben. In *Die Entstehung von Masse und die Natur der Gravitation* sowie in einigen unserer anderen Studien wird erläutert, dass *alle Schwarzen Löcher* auf diese Weise entstehen. Bei Schwarzen Löchern von der [Planck-](#) über die [Hadronen-](#) bis zur [kosmologischen](#) Skala handelt es sich um [kohärente](#) Schwingungen von [Quantenvakuumfluktuationen](#),

einschließlich der Nullpunktsenergie des [elektromagnetischen Feldes](#), und daher entstehen sie aus dieser allgegenwärtigen [Energiedichte](#) – wenn sich diese in kohärenten Phasen der [Fluktuationen](#) befindet, wie anhand von [Korrelationsfunktionen](#) in organisierter Materie nachgewiesen werden kann.

Der Ursprung der Masse und die Natur der Schwerkraft

In meinen drei Jahrzehnten der Forschung habe ich nachgewiesen, dass die [Nullpunktsenergie](#) und die [Quantenvakuumfluktuationen](#) die fundamentale Quelle von [Masse](#) und [Bindungskraften](#) sowohl auf der [hadronischen](#) Skala als auch auf größeren Skalen sind (siehe dazu meine Veröffentlichungen zur [ISF-Forschung](#)).

Auf der hadronischen Skala:

Die Studie zeigt, dass die [Ruhemasse](#) des [Protons](#) präzise aus den [Korrelationsfunktionen](#) der [Erzeugungs- und Vernichtungsoperatoren](#) des [Vakuumzustandes](#) des [elektromagnetischen Feldes](#) bei der [charakteristischen Frequenz](#) des Protons berechnet werden kann – gegeben durch die Wechselwirkungszeit, also jene Zeit, in der die Bindungskraft mit dem Proton interagiert.

Dies könnte auch als die Zeit angegeben werden, die das Licht benötigt, um den Umfang eines Protons zu durchlaufen, oder als die Zeit, die ein Proton für eine Umdrehung mit [Lichtgeschwindigkeit](#) benötigt.

Dies steht auch im Einklang mit der Lebensdauer des [Rho-Mesons](#), das im [Standardmodell](#) als das [Teilchen](#) angesehen wird, welches die bindende Kraft vermittelt.

Dies deutet darauf hin, dass die [Masse](#) des [Protons](#) direkt aus [kohärenten](#) Schwingungen von [Quantenvakuumfluktuationen](#) hervorgeht, die ihren Ursprung in der [Nullpunktsenergie](#) haben.

Es hat sich gezeigt, dass die [starke Kernkraft](#), welche die [Quarks](#) innerhalb von [Hadronen](#) zusammenhält, sich eher als das Resultat eines [Druckgradienten](#) in den [Quantenvakuumfluktuationen](#) zeigt, als das eines [Gluonenaustausches](#), wie es in den Standardmodellen zur [Quantenchromodynamik](#) der Fall ist.

Auf größeren Skalen:

Es hat sich gezeigt, dass derselbe Mechanismus der [Quantenvakuumfluktuationen](#), welcher auf der [hadronischen](#) Skala die [Masse](#) und die [starke Kraft](#) erzeugt, auf [makroskopischer](#) Skala die [Newtonsche Gravitation](#) hervorbringt.

Die Gravitation entsteht als Resteffekt der [Druckgradienten](#) in der [Energiedichte](#) des [Quantenvakuums](#), welche auf größeren Skalen auftreten.

Dies vereint den Ursprung von [Masse](#), [starker Kraft](#) und [Gravitation](#) als unterschiedliche Erscheinungsformen derselben zugrunde liegenden Prozesse des [Quantenvakuums](#).

Wichtige Punkte:

Anstelle separater [Felder](#) für jeden [Teilchentyp](#), wie im [Standardmodell](#), wird ausschließlich das [elektromagnetische Feld](#) benötigt.

Die [Masse](#) und die [Kräfte](#) entstehen durch einen „Abschirmungsprozess“, bei dem die [Vakuumenergie](#) auf der [Planck-Skala](#) sich zu niedrigeren [Energiedichten](#) auf größeren Skalen [dissipiert](#).

Diese Abschirmung erfolgt durch [geometrodynamische](#) Einkapselung, bei der der Vakuumdruck auf der [Planck-Skala](#) eine [Raumzeitkrümmung](#) hervorruft.

Die gesamte [Masse-Energie](#) des beobachtbaren [Universums](#) lässt sich ohne die Notwendigkeit von [Dunkler Materie](#) oder [Dunkler Energie](#) erklären.

Unsere Forschungsarbeit liefert eine einheitliche Erklärung für [Masse](#) und [fundamentale Kräfte](#), die ausschließlich auf den Prozessen [elektromagnetischer Quantenvakuumfluktuationen](#) basiert, welche aus der unauslöschlichen [Nullpunktsenergie](#) des [elektromagnetischen Feldes](#) über verschiedene Skalen hinweg hervorgehen. Dies stellt eine bedeutende Abweichung von den [Standardmodellen der](#)

Elementarteilchenphysik dar und löst langjährige Probleme in der Physik, wie etwa das Hierarchieproblem, das Problem der Quelle von Masse und Kräften sowie das Problem der kosmologischen Konstanten.

Bedeutung der Nullpunktsenergie im Rahmen der Studie

Die Verwendung der Nullpunktsenergie in der Studie stellt konventionelle Ansichten infrage, indem sie Folgendes postuliert:

Die Masse des Protons geht aus Wechselwirkungen des Quantenvakuums hervor und nicht ausschließlich aus der Dynamik von Quarks und Gluonen.

Die Kernkräfte sind eine Manifestation der Auswirkungen der Nullpunktsenergie und sie bieten eine neuartige Erklärung für die Kernbindung, ohne dass hierfür ein Gluonenaustausch erforderlich ist.

Die Gravitation und andere fundamentale Kräfte werden in einem Rahmen vereint, in welchem sie aus dem Quantenvakuumfeld hervorgehen und nicht als eigenständige fundamentale Kräfte auftreten.

Die tiefgreifenden Auswirkungen der Nullpunktsenergie

Die Nullpunktsenergie bildet einen grundlegenden Eckpfeiler der fundamentalen Physik mit weitreichenden Auswirkungen, die vom Quantenbereich bis zu kosmologischen Skalen reichen. Ihre Bedeutung kann nicht hoch genug eingeschätzt werden, da sie unser Verständnis der Quantenmechanik, der Quantenfeldtheorie und sogar der Natur des Vakuums selbst untermauert.

Auf der grundlegendsten Ebene erklärt die Nullpunktsenergie, warum die absolute Nulltemperatur unerreichbar ist, da Quantensysteme stets eine Restenergie behalten. Diese Erkenntnis hat tiefgreifende Konsequenzen für unser Verständnis von Materie und Energie. Die Entdeckung, dass Teilchen wie die Elektronen in den Atomen aufgrund ihrer Wechselwirkung mit dem Nullpunktfeld nicht spiralförmig in den Kern fallen, hat unser Modell der Atomstruktur revolutioniert. Darüber hinaus hat die Erkenntnis, dass das Vakuum nicht leer ist, sondern von Energie durchdrungen ist, zu einem Paradigmenwechsel in unserer Vorstellung vom Raum selbst geführt.

In der Quantenfeldtheorie spielt die Nullpunktsenergie eine entscheidende Rolle bei der Erklärung von Phänomenen wie dem Casimir-Effekt, der spontanen Emission und der Lamb-Verschiebung. Diese Effekte, die einst als theoretische Kuriositäten galten, sind mittlerweile experimentell bestätigt worden und liefern robuste Beweise für die Realität von Quantenvakuumfluktuationen. Das Konzept der Nullpunktsenergie hat auch Eingang in die Kosmologie gefunden, wo es als mögliche Erklärung für die Dunkle Energie und die beschleunigte Expansion des Universums vorgeschlagen wurde.

Die technologischen Anwendungen der Nutzung von Nullpunktsenergie sind geradezu revolutionär. Wenn sie erfolgreich entwickelt werden, könnten sie unsere Welt auf vielfältige Weise grundlegend verändern:

Energieerzeugung: Die Fähigkeit, das gewaltige Meer der Nullpunktsenergie anzuzapfen, könnte praktisch eine nahezu unerschöpfliche, saubere Energiequelle erschließen. Dies würde die globale Energiekrise lösen, die Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen beseitigen und unseren CO₂-Fußabdruck drastisch reduzieren.

Weltraumforschung: Antriebssysteme auf der Basis von Nullpunktsenergie könnten interstellare Reisen ermöglichen, indem sie eine kontinuierliche Beschleunigung ohne Treibstoffmasse ermöglichen.

Quantencomputing: Die Manipulation der Nullpunktsenergie könnte zu neuen Architekturen für Quantencomputer führen, die möglicherweise die derzeitigen Grenzen in der Quanteninformationsverarbeitung überwinden.

Materialwissenschaft: Das Verständnis und die Kontrolle der Nullpunktsenergie im Nanobereich könnten zur Entwicklung neuer Materialien mit außergewöhnlichen Eigenschaften führen, wie etwa Supraleiter bei Raumtemperatur oder Materialien mit einem Reibungskoeffizienten von null.

Medizinische Anwendungen: Auf der [Nullpunktenergie](#) basierende Technologien könnten [nichtinvasive Bildgebungs-](#) und [Behandlungsmethoden](#) ermöglichen, die weit über unsere derzeitigen Möglichkeiten hinausgehen.

Kommunikation: Die Technik des [Quantenvakuums](#) könnte potenziell zu [instantanen Kommunikationssystemen](#) führen und damit die globale [Telekommunikation](#) revolutionieren.

Gravitationskontrolle: Mit zunehmendem Verständnis der Beziehung zwischen [Nullpunktenergie](#) und [Gravitation](#) könnten [Technologien](#) zur Manipulation der Gravitation entwickelt werden, mit Auswirkungen von der [Bauindustrie](#) bis zur [Besiedlung des Weltraums](#).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die [Nullpunktenergie](#) eine [Schnittstelle](#) darstellt, an der die [fundamentale Physik](#) auf eine [disruptive Technologie](#) trifft. Sie stellt unsere klassischen Vorstellungen von der [Natur des leeren Raumes](#) und der [Energie](#) infrage und bietet verlockende Möglichkeiten für [technologische Revolutionen](#). Während wir dieses Phänomen weiter erforschen und verstehen, stehen wir möglicherweise kurz davor, eines der tiefsten Geheimnisse des [Universums](#) zu lüften, das das Potenzial hat, unsere Welt auf eine Weise umzugestalten, die wir uns kaum vorstellen können.

Hoffnung für die Zukunft

Die [Nullpunktenergie](#) stellt einen Eckpfeiler der [Grundlagenphysik](#) dar, der die [Quantenmechanik](#), die [Feldtheorie](#) und unser Verständnis von der [Natur des Raumes](#) selbst miteinander verbindet. Ihre Bedeutung reicht weit über [theoretische Konstrukte](#) hinaus, da sie die Grundlage der [Realität](#) bildet – von der Stabilität der [Materie](#) bis zum Verhalten des [Kosmos](#). Die Entdeckung, dass selbst das [Vakuum](#) des [Raumes](#) über eine [Energiedichte](#) ungleich null verfügt, hat tiefgreifende Auswirkungen auf unser Verständnis des [Universums](#) und eröffnet vielversprechende Möglichkeiten für [technologische Innovationen](#). Während die Forscher weiterhin Methoden zur Nutzung dieser allgegenwärtigen [Energiequelle](#) entwickeln, stehen wir kurz vor einer möglichen [Revolution](#) in der [Energieerzeugung](#) und -nutzung. Die erfolgreiche Umsetzung von Technologien zur Nutzung der Nullpunktenergie könnte zu einem [Paradigmenwechsel](#) in der Art und Weise führen, wie wir unsere Welt mit Energie versorgen, und möglicherweise eine unerschöpfliche, saubere Energiequelle bereitstellen, mit der [globale Energieprobleme](#) gelöst und [Umweltprobleme](#) entschärft werden können. Darüber hinaus könnte die Fähigkeit, die [Fluktuationen](#) des [Quantenvakuums](#) zu manipulieren, neue Horizonte in den Bereichen [Antrieb](#), [Kommunikation](#) und [Computertechnologie](#) eröffnen. Obwohl noch erhebliche Herausforderungen bestehen bleiben, stellt die laufende Forschung zur Nullpunktenergie eines der spannendsten Grenzgebiete der Physik dar – mit dem Potenzial, unser Verständnis des Universums zu transformieren und unsere technologischen Fähigkeiten auf eine Weise zu revolutionieren, die wir uns erst ansatzweise vorstellen können.

Referenzen

1. A. Einstein, O. Stern (1913). Einige Argumente für die Annahme einer molekularen Agitation beim absoluten Nullpunkt. *Annalen der Physik*, vol. 345, Issue 3, pp.551-560. <https://doi.org/10.1002/andp.19133450309>.
2. Kirchhoff, G. (1860). "Über das Verhältniss zwischen dem Emissionsvermögen und dem Absorptionsvermögen der Körper für Wärme and Licht". *Annalen der Physik und Chemie*. 109 (2): 275-301.
3. J. Mehra, *The Golden Age of Theoretical Physics: (Boxed Set of 2 Volumes)*. WORLD SCIENTIFIC, 2001. doi: 10.1142/4454.
4. Sinha, K. P.; Sivaram, C.; Sudarshan, E. C. G. (1976). "Aether as a superfluid state of particle-antiparticle pairs". *Foundations of Physics*. Springer Nature. 6 (1): 65-70. doi:10.1007/bf00708664.
5. Sinha, K. P.; Sivaram, C.; Sudarshan, E. C. G. (1976). "The superfluid vacuum state, time-varying cosmological constant, and nonsingular cosmological models". *Foundations of Physics*. Springer Nature. 6 (6): 717-726. doi:10.1007/bf00708950.
6. N. Hamein, C. Guernonprez, and O. Alirol, "The Origin of Mass and the Nature of Gravity," Sep. 2023, doi:10.5281/zenodo.8381114.
7. Casimir, H. B. G.; Polder, D. (15 February 1948). "The Influence of Retardation on the London-van der Waals Forces". *Physical Review*. 73 (4): 360-372. doi:10.1103/PhysRev.73.360.

8. Lamoreaux, S. K. (1997). "Demonstration of the Casimir Force in the 0.6 to 6 μm Range". *Physical Review Letters*. 78 (1): 5-8. doi:10.1103/PhysRevLett.78.5.
9. K. Autumn et al., "Adhesive force of a single gecko foot-hair", *Nature*, vol. 405, no. 6787, pp. 681-685, Jun. 2000, doi: 10.1038/35015073.
10. K. Autumn and N. Gravish, "[Gecko adhesion: Evolutionary nanotechnology](#)". *Philos Trans A Math Phys*, *Eng Sci.*, vol. 2008, pp. 1575-1590.
11. W. Wang, Y. Liu, and Z. Xie, "Gecko-Like Dry Adhesive Surfaces and Their Applications: A Review", *J Bionic Eng*, vol. 18, no. 5, pp. 1011-1044, Sep. 2021, doi: 10.1007/s42235-021-00088-7.
12. I. Bono, E. Del Giudice, L. Gamberale, and M. Henry, "Emergence of the Coherent Structure of Liquid Water", *Water*, vol. 4, no. 3, pp. 510-532, Jul. 2012, doi: 10.3390/w4030510.
13. J. Keppler, "Laying the foundations for a theory of consciousness: the significance of critical brain dynamics for the formation of conscious states", *Front. Hum. Neurosci.*, vol. 18, p. 1379191, Apr. 2024, doi: 10.3389/fnhum.2024.1379191.
14. H. B. Chan, V. A. Aksyuk, R. N. Kleiman, D. J. Bishop, and F. Capasso, Nonlinear micromechanical Casimir oscillator, *Phys. Rev. Lett.* 87, 211801 (2001).
15. R. Zhao, L. Li, S. Yang, W. Bao, Y. Xia, P. Ashby, Y. Wang, and X. Zhang, Stable Casimir equilibria and quantum trapping, *Science* 364, 984 (2019).
16. K. Y. Fong, H.-K. Li, R. Zhao, S. Yang, Y. Wang, and X. Zhang, Phonon heat transfer across a vacuum through quantum fluctuations, *Nature* 576, 243 (2019).
17. J. M. Pate, M. Goryachev, R. Y. Chiao, J. E. Sharping, and M. E. Tobar, Casimir spring and dilution in macroscopic cavity optomechanics, *Nature Physics* 16, 1117-1122 (2020).
18. A. E. R. Lopez and V. Giannini, "Casimir nanoparticle levitation in vacuum with broadband perfect magnetic conductor metamaterials." arXiv, Jun. 27, 2023. <http://arxiv.org/abs/2210.12094>.
19. J. N. Munday and F. Capasso, "REPULSIVE CASIMIR AND VAN DER WAALS FORCES: FROM MEASUREMENTS TO FUTURE TECHNOLOGIES," *Int. J. Mod. Phys. A*, vol. 25, no. 11, pp. 2252-2259, Apr. 2010, doi: 10.1142/S0217751X10049529.
20. Z. Xu, X. Gao, J. Bang, Z. Jacob, and T. Li, "Non-reciprocal energy transfer through the Casimir effect," *Nat. Nanotechnol.*, vol. 17, no. 2, Art. no. 2, Feb. 2022, doi: 10.1038/s41565-021-01026-8.
21. Z. Xu, P. Ju, X. Gao, K. Shen, Z. Jacob, and T. Li, "Observation and control of Casimir effects in a sphere-plate-sphere system", *Nat Commun*, vol. 13, no. 1, p. 6148, Oct. 2022, doi: 10.1038/s41467-022-33915-4.
22. G. Model, A. Weerakkody, D. Doroski, D. Bartusiak, Casimir-cavity-induced conductance changes. *Physical Review Research*, 3, L022007 (2021); DOI: 10.1103/PhysRevResearch.3.L022007.
23. G. Model, A. Weerakkody, D. Doroski and D. Bartusiak, [Optical-Cavity-Induced Current](#). *Symmetry*, 13(3), 517; doi.org/10.3390/sym13030517 (2021).
24. O. Dmitriyeva and G. Model, "Test of Zero-point Energy Emission from Gases Flowing Through Casimir Cavities", *Physics Procedia*, vol. 38, pp. 8-17, 2012, doi: 10.1016/j.phpro.2012.08.007.
25. Einstein, Albert; Stern, Otto (1913). "Einige Argumente für die Annahme einer molekularen Agitation beim absoluten Nullpunkt" ("Some arguments for the assumption of a molecular agitation at the absolute zero point"). *Annalen der Physik* (in German). 345 (3): 551-560. doi:10.1002/andp.19133450309.
26. P. W. Milonni, "Quantum mechanics of the Einstein-Hopf model", *American Journal of Physics*, vol. 49, no. 2, pp. 177-184, Feb. 1981, doi: 10.1119/1.12552.
27. H. Kragh, "Walther Nernst: grandfather of dark energy?", *Astronomy & Geophysics*, vol. 53, no. 1, p. 1.24-1.26, Feb. 2012, doi: 10.1111/j.1468-4004.2012.53124.x.
28. Q. Wang, Z. Zhu, and W. G. Unruh, "How the huge energy of quantum vacuum gravitates to drive the slow accelerating expansion of the Universe", *Phys. Rev. D*, vol. 95, no. 10, p. 103504, May 2017, doi: 10.1103/PhysRevD.95.103504.
29. Einstein, Albert (1922). Jeffery, G. B.; Perrett, W. (eds.). *Sidelights on Relativity: Ether and the Theory of Relativity*. New York: Methuen & Co. pp. 1-24.
30. Nernst, W. (1916) über einen Versuch, von quantentheoretischen Betrachtungen zur Annahme stetiger Energieänderungen zurückzukehren ("about an attempt to return from quantum theoretical considerations to the assumption of continuous energy changes"). *Verhandlungen der Deutschen Physikalischen*, 18, 83-116.
31. Peebles, P. J. E.; Ratra, B. (2003). "The Cosmological Constant and Dark Energy". *Reviews of Modern Physics*. 75 (2): 559-606. arXiv:astro-ph/0207347.
32. P.W. Milonni, and M. -L. Shih (1991). Zero-point energy in early quantum theory. *American Journal of Physics*, 59, 684 (1991); doi: 10.1119/1.16772. <http://dx.doi.org/10.1119/1.16772>.

33. P. A. M. Dirac (1927). "The Quantum Theory of the Emission and Absorption of Radiation". *Proceedings of the Royal Society of London A*. 114 (767): 243-65. doi:10.1098/rspa.1927.0039.
34. Richard P. Feynman (2014). "*QED: The Strange Theory of Light and Matter*", p.128, Princeton University Press.
35. Lodge, O. Modern Views of the Ether. *Nature* 75, 519-522 (1907). <https://doi.org/10.1038/075519a0>.
36. Sir Oliver Lodge (1907) XXXIX. *The density of the æther*, The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 13:76, 488-506, doi: 10.1080/14786440709463624.
37. Haramein, N & Val Baker, A. K. F. (2019). [Resolving the Vacuum Catastrophe: A Generalized Holographic Approach](#), *Journal of High Energy Physics, Gravitation and Cosmology*, Vol.05 No.02(2019), Article ID:91083, 13 pages.
38. E. Di Valentino, A. Melchiorri, and J. Silk, "Planck evidence for a closed Universe and a possible crisis for cosmology", *Nat Astron*, vol. 4, no. 2, pp. 196-203, Feb. 2020, doi: 10.1038/s41550-019-0906-9.
39. Misner, Charles W; Wheeler, John A (1957). "Classical physics as geometry". *Annals of Physics*. 2 (6): 525-603. doi:10.1016/0003-4916(57)90049-0.
40. J. A. Wheeler, "On the nature of quantum geometrodynamics", *Annals of Physics*, vol. 2, no. 6, pp. 604-614, Dec. 1957, doi: 10.1016/0003-4916(57)90050-7.

Abgerufen von „https://lenr.wiki/index.php?title=Was_ist_Nullpunktsenergie%3F&oldid=7929“

Diese Seite wurde zuletzt am 14. Juli 2025 um 10:49 Uhr bearbeitet.