

## Vacuum<sup>1</sup>

Vacuum (leer, frei) bezeichnete bis zum 19. Jahrhundert allein den körperlosen Raum. Unter dem Einfluss physikalischer (Feld-) Theorien meint der Terminus inzwischen diejenige residuale physische Entität, die einen vorgegebenen Raum ausfüllt bzw. im Prinzip ausfüllen würde, nachdem alles, was mit physikalischen Mitteln entfernt werden kann, aus dem Raum entfernt wurde [1]. Theorien über das V. sind daher eng mit Theorien über die Struktur des Raumes [2], die Bewegung [3], die physikalischen Gegenstände [4] und deren Wechselwirkungen verbunden. In der Quantentheorie bezeichnet V. den Zustand niedrigster Energie (Grundzustand) eines Systems.

Während die Atomisten alles Seiende auf den leeren Raum und die Atome zurückführten, finden sich bei Parmenides, Aristoteles, in der scholastischen Naturphilosophie [5], bei Spinoza [6] und bei R. Descartes Überlegungen, die zeigen sollen, dass es den leeren Raum nicht geben kann. Nach Aristoteles ist der Raum ein Örterraum, d.h. gebildet aus den Örtern der Dinge. Daher kann es auch keinen leeren Raum geben. In diesem Zusammenhang argumentiert Aristoteles vor einem atomistischen Hintergrund (1) gegen die Annahme eines von den Dingen unabhängigen Raumes (Phys. 8.214b12-216a25), (2) gegen die Vorstellung, der (leere) Raum sei der Raum, in den die Dinge treten (loc. cit. 216a26-b21), und (3) gegen die Existenz eines leeren Raumes in den Dingen (loc.cit. 9.216b22-217b28). Descartes entwickelt sein logisch-ontologisches Argument aus den Prämissen, dass (1) Materie mit *res extensa* zu identifizieren ist, (2) Ausdehnung ein Prädikat ist, und es (3) keine Eigenschaften ohne einen Träger dieser Eigenschaften geben kann [7]. Die Debatte um die Existenz des V.s wird bei I. Newton und G.W. Leibniz weitergeführt. Newton behauptet die Existenz des V.s und benutzt dies (im Gegensatz zu modernen Interpreten seiner Theorie), um gegen die Möglichkeit von Fernwirkungen, d.h. von Wirkungen ohne materielle Vermittlung, zu argumentieren [8]. G.W. Leibniz hingegen verweist darauf, dass es nicht möglich ist, einen absolut leeren Raum herzustellen, weil es immer etwas gibt, das ihn durchdringen kann (z.B. Licht) [9].

Im Prozess des Fortschreitens der physikalischen Theoriebildung und der experimentellen Praxis haben sich die folgenden Varianten des V.-Begriffs herausgebildet:

1. Das V. der Klassischen Mechanik und Thermodynamik. Dabei handelt es sich um einen idealen, in der Praxis jedoch nicht vollständig erreichbaren Zustand (perfektes

---

<sup>1</sup>Ein leicht erweiterte Version dieses Artikels erschien in H. Gründer et al. (eds.), *Historisches Wörterbuch der Philosophie*. Basel: Schwabe 2001, 527–530.

- V.) eines Raumes, der sich durch die Abwesenheit von Körpern auszeichnet [10]. Die (näherungsweise) technische Erzeugung und der Nachweis eines solchen Zustandes gelang E. Torricelli 1643, was in der Folge zur allmählichen Zurückweisung der Vorstellung vom horror vacui führte [11].
2. Das V. der Elektrodynamik und der Speziellen Relativitätstheorie. In der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts kristallisierte sich heraus, dass (elektromagnetische) Felder eigenständige und von Körpern unabhängige Entitäten sind, die selbst körperlose Räume zu durchdringen und auszufüllen vermögen [12]. Die Identifikation des leeren Raumes mit dem klassischen Äther als Träger elektromagnetischer Felder wird von der Speziellen Relativitätstheorie (Einstein 1905 [13]) zurückgewiesen [14].
  3. Das V. in der Allgemeinen Relativitätstheorie. Hier zeigt sich deutlich die Abhängigkeit des V.-Zustandes von der zugrundeliegenden Raumkonzeption. Selbst im körperlosen und feldfreien Fall (d.h. bei verschwindendem Energie-Impuls-Tensor) haben die Einsteinschen Feldgleichungen [15] nicht-triviale Lösungen, die gekrümmte Räume beschreiben (wie z.B. die Schwarzschildlösung [16]). Die Interpretation dieser Lösungen in Bezug auf die V.-Frage hängt davon ab, welchen ontologischen Status das metrische Feld hat. Hier kommen Substantialisten, Relationalisten und Essentialisten zu unterschiedlichen Auffassungen [17]. Enthalten diese Gleichungen zusätzlich einen kosmologischen Term (Einstein 1917), so drückt die darin auftretende kosmologische Konstante gerade die nicht-verschwindende Energiedichte des betreffenden V.s aus [18].
  4. Das V. der Quantenmechanik. Auch in der Quantenmechanik ist mit dem (strukturlosen) V.-Zustand ein von null verschiedener Energiewert verbunden (Nullpunktsenergie). Dieser Effekt ist eine direkte Konsequenz der Heisenbergschen Unschärferelation und hat beobachtbare Konsequenzen [19].
  5. Das V. der Relativistischen Quantenfeldtheorie. Unter V. versteht man hier den Zustand niedrigster Energie eines durch quantisierte Felder beschriebenen und wechselwirkenden Systems. Im Gegensatz zur gewöhnlichen Quantenmechanik weisen diese V.-Zustände jedoch charakteristische Fluktuationen auf, die ebenfalls beobachtbare Folgen haben können (z.B. die Lamb-Verschiebung). Das V. erscheint nun als hochgradig strukturiert und mit virtuellen Teilchen bevölkert [20] und weist eine

Vielzahl interessanter Effekte und Eigenschaften auf, die jedoch im einzelnen von der konkreten Wechselwirkung abhängen. So gibt es gequetschte [21], zerfallende [22] sowie wahre und falsche Vakua, desweiteren Vakua mit nicht verschwindenden Erwartungswerten bestimmter (Higgs-)Felder, Abschirm-, Anti-Abschirm- und Polarisierungseffekte, das Tunneln von einem V. in ein anderes [23] sowie das Auftreten von Anomalien und das Phänomen der spontanen Symmetriebrechung. Letztere liegt genau dann vor, wenn der V.-Zustand eine geringere Symmetrie hat als die zugehörige Theorie [24].

6. Das V. der Hohlraum-Quantenelektrodynamik. Ähnlich wie in der Allgemeinen Relativitätstheorie zeigt sich auch hier, dass die Modenstruktur des V.-Zustandes (des elektromagnetischen Feldes) von der Geometrie des zugrundeliegenden Raumes abhängt. Dies hat zahlreiche experimentelle Konsequenzen (z.B. den Casimir-Effekt [25]).
7. Das V. der Quantenkosmologie. Wendet man die Quantenfeldtheorie auf die Welt im ganzen an, so kommt es zum komplexen Wechselspiel quantenfeldtheoretischer und allgemeinrelativistischer Effekte. Diese betreffen insbesondere das hochgradig strukturierte und damit vom bloßen Nichts zu unterscheidende Quanten-V., das den Ausgangspunkt von physikalischen ex-nihilo-Kosmogonien bildet [26]. Eine wichtige Anwendung der Quantenfeldtheorie auf die Welt im ganzen ist das inflationäre Szenario [27]. Den Annahmen dieses Modells zufolge befand sich das Universum kurz nach dem Urknall nicht im energetisch niedrigsten Zustand, sondern in einem falschen V., aus dem es qua Tunneleffekt in das wahre V. gelangte, wobei die dabei kurzzeitig frei werdende Energie eine exponentielle Expansion des Universums zur Folge hatte [28].

Die philosophische Debatte um das V. in der modernen Physik lässt sich in drei Gruppen einteilen: Eines der *methodologischen* Probleme ist die Explikation der in der wissenschaftlichen Praxis bewährten Strategie, Eigenschaften und Verhalten eines komplexen physikalischen Systems aus Erwartungswerten von geeigneten Operatoren im V.-Zustand zu erklären. Zu den *epistemologischen* Problemen gehört die Analyse der Rolle des V.s im Konflikt zwischen fundamentalen Prinzipien der Quantenfeldtheorie und der Allgemeinen Relativitätstheorie. Dieser Konflikt zeigt sich u.a. bei der Konstruktion von vereinheitlichten Theorien und beim Problem der kosmologischen Konstanten. Es

stellte sich heraus, dass Berechnungen dieser Größe aus astrophysikalischen Beobachtungsdaten unter Verwendung der Allgemeinen Relativitätstheorie und Berechnungen auf der Grundlage quantenfeldtheoretischer Überlegungen zu radikal unterschiedlichen Ergebnissen gelangen. Ein adäquates Verständnis des V.s wird so zum Prüfstein einer jeden vereinheitlichten Theorie, die Mikro- und Makrokosmos in konzeptionell einheitlicher Weise beschreiben und erklären will [29]. Besonders intensiv diskutiert werden *ontologische* Fragen. Es hat sich gezeigt, dass der V.-Begriff (wie auch der verwandte Teilchenbegriff) in vielfacher Hinsicht unbestimmt ist. Zum einen konnte gezeigt werden, dass der V.-Zustand nur nach vorheriger Spezifikation eines Bezugssystems definiert werden kann. So wird etwa der V.-Zustand eines inertialen Beobachters B für einen relativ zu B beschleunigten Beobachter B' als ein Zustand mit thermischer Photonen-Verteilung wahrgenommen (Unruh-Effekt [30]). Zum anderen zeigen Studien zur Quantenfeldtheorie in gekrümmten Raumzeiten, dass Teilchenzahloperatoren, also Operatoren, die dem V. den Eigenwert null zuweisen, nur in bestimmten (z.B. flachen) Raumzeiten existieren [31]. Schließlich sollen noch Resultate aus der Algebraischen Quantenfeldtheorie [32] erwähnt werden, denen zufolge Teilchen nicht mehr in einem endlichen Raumgebiet lokalisierbar sind, falls bestimmte plausible Annahmen über das V. gemacht werden [33].

**Anmerkungen.** [1] Vgl. J.C. Maxwell: A treatise on electricity and magnetism (Dover 1954).- [2] Vgl. Artikel <Raum>.- [3] Vgl. Artikel <Bewegung>; s. auch E. Grant: Much ado about nothing (Cambridge 1981), 24-66.- [4] Vgl. Artikel <Substanz>.- [5] Vgl. Artikel <Horror vacui, fuga vacui>.- [6] B. de Spinoza: Die Ethik (1980), Buch I, prop. 15 scholium.- [7] R. Descartes: Die Prinzipien der Philosophie (1955), II. Teil; vgl. auch J.C. Graves: The conceptual foundations of contemporary relativity theory (Cambridge, Mass. 1971), 79-101, sowie R. Weingard: Making everything out of nothing, in: S. Saunders/H. Brown (hg.): The philosophy of vacuum (Oxford 1991), 197-200.- [8] Vgl. den Brief an R. Bentley, 25. Februar, 1692/3. In: A.R. Hall/M.B. Hall (hg.): Unpublished scientific papers of I. Newton (Cambridge 1962). Vgl. auch J.C. Graves, loc. cit., chap. 7.- [9] G.W. Leibniz, Streitschr. Zw. Leibniz und Clark. Philos. Schr.. hg. C.I. Gerhardt 7 (1890, ND 1961), 396-397.- [10] Vgl. R. Penrose: The mass of the classical vacuum, in: S. Saunders/H. Brown (hg.), loc. cit. Anm [7], 21.- [11] Vgl. Artikel <horror vacui>; dazu auch S. Shapin/S. Schaffer, Leviathan and the air-pump (Princeton 1985).- [12] Vgl. E. Whittaker: A history of aether and electricity, Vol. 1 (New York 1973).- [13] Vgl. Artikel <Relativitätstheorie>.- [14] Vgl. A. Einstein: über den äther.

In: Schweizerische naturforschende Gesellschaft, Verhandlungen 105 (1924), 85-93; dazu auch S. Saunders/H. Brown: Reflections on ether, in: S. Saunders/H. Brown (hg.), loc. cit. Anm. [7], 27.- [15] Vgl. Artikel <Relativitätstheorie>; dazu auch B. Kanitscheider: Kosmologie (1984), 164-181.- [16] Vgl. R. dInverno: Einführung in die Relativitätstheorie (1995), 246-252.- [17] Vgl. C. Ray: Time, space and philosophy (London 1991), 139-142.- [18] Vgl. R. dInverno, loc. cit. Anm. [16], 225-227.- [19] Vgl. D. Sciama, The physical significance of the vacuum state of a quantum field, in: S. Saunders/H. Brown (eds.), loc. cit. Anm. [7], 139-143.- [20] Vgl. R. Weingard: Virtual particles and the interpretation of quantum field theory, in: H. Brown/R. Harr (hg.): Philosophical foundations of quantum field theory (Oxford 1988), 43.- [21] M.O. Scully/M.S. Zubairy: Quantum optics (Cambridge 1997).- [22] W. Greiner/B. Müller/J. Rafelski: Quantum electrodynamics of strong fields (1985).- [23] Details zu allen genannten Punkten finden sich in I. Aitchison: Nothings plenty, in: Contemporary Physics 26 (1985), 333.- [24] Vgl. S.Y. Auyang, How is quantum field theory possible? (New York 1995), 53 f.- [25] P.W. Milonni: The quantum vacuum (Boston 1994).- [26] B. Kanitscheider, loc. cit. Anm. [15], 307-309; vgl. dazu auch S.W. Hawking/R. Penrose: The nature of space and time (Princeton 1995), 75-103.- [27] Vgl. J. Earman: Bangs, Crunches, Whimpers, and Shrieks (Oxford 1995), 124-159.- [28] Vgl. P.D.B. Collins/A.D. Martin/E.J. Squires: Particle physics and cosmology (New York 1989), 396-420.- [29] Vgl. B. Suchan: Die Stabilität der Welt (1999).- [30] W. Unruh: Notes on black hole evaporation, Physical Review D14 (1976), 870; vgl. D. Sciama, loc. cit. Anm. [19], sowie kritisch dazu S. Saunders: Introduction, in: S. Saunders/H. Brown (hg.), loc. cit. Anm. [7], 8.- [31] Vgl. R.M. Wald: Quantum field theory in curved spacetime and black hole thermodynamics (Chicago 1994).- [32] Vgl. R. Haag, Local quantum physics (1996).- [33] Zu diesen Resultaten gehört das Reh-Schlieder Theorem; vgl. M. Redhead: More ado about nothing, Foundations of Physics 25 (1995), 123; dazu auch D.B. Malament: In defense of dogma: why there cannot be a relativistic quantum mechanics of (localizable) particles, in: R. Clifton (hg.): Perspectives on quantum reality (Dordrecht 1996), 1.-

Weitere Lit. s. die Artikel <horror vacui> und <Leere>.

S. Hartmann