

Frank Close

Das Nichts verstehen

Die Suche nach dem Vakuum und die
Entwicklung der Quantenphysik

Aus dem Englischen übersetzt
von Thomas Filk

Spektrum
AKADEMISCHER VERLAG

Titel der Originalausgabe: The Void

Aus dem Englischen übersetzt von Thomas Filk

© Frank Close 2007

„The Void“ was originally published in English in 2007. This translation is published by arrangement with Oxford University Press

Wichtiger Hinweis für den Benutzer

Der Verlag, der Herausgeber und die Autoren haben alle Sorgfalt walten lassen, um vollständige und akkurate Informationen in diesem Buch zu publizieren. Der Verlag übernimmt weder Garantie noch die juristische Verantwortung oder irgendeine Haftung für die Nutzung dieser Informationen, für deren Wirtschaftlichkeit oder fehlerfreie Funktion für einen bestimmten Zweck. Der Verlag übernimmt keine Gewähr dafür, dass die beschriebenen Verfahren, Programme usw. frei von Schutzrechten Dritter sind. Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Buch berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften. Der Verlag hat sich bemüht, sämtliche Rechteinhaber von Abbildungen zu ermitteln. Sollte dem Verlag gegenüber dennoch der Nachweis der Rechtsinhaberschaft geführt werden, wird das branchenübliche Honorar gezahlt.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer ist ein Unternehmen von Springer Science+Business Media
springer.de

© Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg 2009

Spektrum Akademischer Verlag ist ein Imprint von Springer

09 10 11 12 13 5 4 3 2 1

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere fürervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Planung und Lektorat: Frank Wigger, Jutta Liebau, Martina Mechler

Redaktion: Annette Heß

Umschlaggestaltung: WSP design Werbeagentur GmbH, Heidelberg

Herstellung und Satz: Crest Premedia Solutions [P] Ltd., Pune, Maharashtra, India

ISBN 978-3-8274-2095-4

Inhalt

1	Viel Lärm um Nichts	1
2	Wie leer ist ein Atom?	27
3	Raum	49
4	Wellen in was?	63
5	Die Reise auf dem Lichtstrahl	79
6	Der Preis für leeren Raum	91
7	Das unendliche Meer	111
8	Das Higgs-Vakuum	137
9	Die neue Leere	157
	Literatur	179
	Index	181

1 Viel Lärm um Nichts

Nahezu jedem von uns kommt irgendwann die Frage in den Sinn: „Wo kommt eigentlich alles her?“ Wir fragen uns vielleicht auch, wo sich unser bewusstes Selbst vor unserer Geburt befunden hat. Wenn Sie zurückblicken, was sind Ihre frühesten Erinnerungen? Als ich in die Schule kam, konnte ich mich mehr oder weniger deutlich an die vergangenen zwei oder drei Jahre erinnern, besonders an die Sommerferien am Meer. Wenn ich jedoch weiter zurückliegende Erinnerungen aufrufen wollte, wurden die Vorstellungen blasser und verschwanden im Nichts. Man sagte mir, das läge daran, dass ich erst fünf Jahre zuvor, 1945, geboren worden war. Unterdessen sprachen meine Eltern von einem Krieg und von Geschehnissen vor dem Krieg – Dingen, die für mich keinerlei Bedeutung besaßen. Die Welt meiner Erfahrung hatte es damals noch nicht gegeben. Sie schien erst mit meiner Geburt erschaffen worden zu sein und mit ihr meine Eltern und die anderen Erwachsenen. Wie konnte es diese Welt „vor“ dem mir bewussten Universum gegeben haben?

Diese seltsame Leere, die ich mit der Zeit vor 1945 verband, beunruhigte mich. Doch im Jahre 1969 verschaffte mir ein besonderes Ereignis eine ganz neue Sichtweise auf dieses Problem.

Apollo 10 schwebte dicht über der Mondoberfläche, und die Wunder der Kommunikationstechnik vermittelten das Bild einer wilden, öden Landschaft aus Felsen und Geröll.

Diese graue Staubwüste erstreckte sich bis zum Mondhorizont, der sich in leichtem Bogen gegen eine schwarze Leere abhob, die nur gelegentlich von scheinbar punktförmigen Sternen unterbrochen wurde; leblosen Bällen aus Wasserstoff, die zu Licht geworden waren. Plötzlich wurde dieses triste Bild von einer wunderbaren Erscheinung unterbrochen: Ein blaues Juwel mit weißen Wolken und grünen Kontinenten der Vegetation erhob sich über den Horizont. Zum ersten Mal wurden Menschen Zeugen eines Erdaufgangs. Es gibt zumindest einen Platz im Universum, auf dem Leben existiert. Unzählige Atome haben sich hier zu Strukturen zusammengefunden, die so organisiert sind, dass sie sich ihrer selbst bewusst werden und das Universum mit Staunen betrachten können.

Was wäre, wenn es kein intelligentes Leben gäbe? In welchem Sinne würde irgendetwas von all dem existieren, wenn sich keine Lebensform dieser Existenz bewusst werden könnte? Vor ungefähr zehn Milliarden Jahren könnte dies der Fall gewesen sein: eine leblose Leere, verstreute Wolken aus Plasma und nackte Felsbrocken, die durch die Weiten des Raumes trieben. Auch wenn es in dieser „vor-bewussten“ Epoche noch kein Leben gab und diese Zeit einer riesigen Variante meines egozentrischen Vor-1945er-Universums glich, in der die Schwerkraft ihren Einfluss noch ohne bewusste Zeugen äußerte, so gab es doch damals schon dieselben Atome, aus denen auch wir heute bestehen. Diese Atome gesellten sich zu komplizierten Verbindungen, deren besondere Organisation die Entstehung von Bewusstsein ermöglicht hat, das nun in der Lage ist, aus dem fernen Universums eben das Licht wahrzunehmen, das in jenen frühen unbelebten Zeiten ausgeschickt wurde. Aus unserem „Jetzt“ heraus können wir diese frühe Epoche bezeugen, wodurch sie eine gewisse Form der Realität annimmt. Wir wurden nicht aus dem Nichts erschaffen, sondern aus einer anfänglichen „Urmaterie“. Vor Milliarden von Jahren entstanden die Atome, die sich nun für einen kurzen Augenblick zu

einem Etwas zusammengefunden haben, das sich seiner bewusst werden kann.

Auf diese Weise gelangte ich schließlich zu meiner eigentlichen Frage: Was wäre, wenn es kein Leben, keine Erde, keine Planeten, keine Sonne oder Sterne gäbe, keine Atome mit der Möglichkeit, sich zu zukünftigen Dingen zusammenzufinden? Was wäre, wenn es einfach nur das Nichts gäbe? Nachdem ich vor meinem geistigen Auge alles aus dem Universum entfernt hatte, versuchte ich mir das Nichts vorzustellen, das noch übrig blieb. Ich machte eine Erfahrung, die den Philosophen schon zu allen Zeiten vertraut war: Es ist sehr schwer, das Nichts zu denken. Als naives Kind hatte ich mich gefragt, wo das Universum gewesen ist, bevor ich geboren wurde, nun versuchte ich mir vorzustellen, was es gäbe, wenn ich überhaupt nicht geboren worden wäre. »Wir sind die Glücklichen, denn wir werden sterben«¹, da es nahezu unendlich viele mögliche DNA-Formen gibt, die mit Ausnahme von einigen Milliarden Kombinationen niemals zu Bewusstsein kommen werden. Was ist das Universum für die, die niemals geboren werden? Was ist es für die Toten? In allen Kulturen gibt es Todesmythen, denn die Vorstellung, dass Bewusstsein einfach verschwinden kann, wenn die Sauerstoffpumpen das Gehirn nicht mehr in Gang halten können, fällt uns schwer. Doch was bedeutet Bewusstsein für solche DNA-Kombinationen, die niemals umgesetzt wurden und auch niemals umgesetzt werden?

Es ist schwer nachzuvollziehen, wie Bewusstsein entstanden ist und wie es wieder stirbt. Ebenso schwer ist es zu verstehen, wie der Stoff des Universums aus dem Nichts entstanden sein soll. Gab es eine Schöpfung, oder gab es schon immer etwas? Könnte es sogar nichts geben, wenn niemand wüsste, dass es nichts gibt? Je mehr ich versuchte, diese Rätsel zu verstehen, desto mehr spürte ich, dass ich entweder an der Schwelle zu wahrer Erleuchtung stand, oder aber kurz davor war, verrückt zu werden. Nach vielen Jahren, in denen ich als Wissenschaftler versucht habe,

das Universum zu verstehen, bin ich auf diese Fragen zurückgekommen und habe mich auf eine Reise nach den möglichen Antworten begeben. Das Ergebnis ist dieses kleine Buch. Ich fühle mich geschmeichelt bei der Vorstellung, dass ich mich mit diesen Fragen in guter Gesellschaft befinde, denn in der ein oder anderen Form wurden dieselben Fragen schon zu allen Zeiten von einigen der größten Philosophen gestellt. Nie konnte man sich auf eine endgültige Antwort einigen. In verschiedenen Epochen gelangte man, je nach der vorherrschenden Philosophie, auch zu verschiedenen Einsichten hierzu. Kann es ein Vakuum geben, einen Zustand des Nichts? Ebenso wie bei den Fragen zur Existenz Gottes scheinen die Antworten sehr davon abzuhängen, was man unter dem Nichts versteht.

Im antiken Griechenland versuchte man die Fragen mit der Macht der Logik anzugehen, doch die Philosophen gelangten zu entgegengesetzten Meinungen. Aristoteles behauptete, einen leeren Raum könne es nicht geben. Diese Vorstellung wurde sogar zu einem Prinzip: „Die Natur verabscheut die Leere.“ Die Angst der Natur vor dem Vakuum wurde sprichwörtlich: der *horror vacui*. Was bedeutet das, und weshalb hielt man für fast 2 000 Jahre an diesem Glauben fest? Dies ist eine der ersten Fragen, denen ich mich widme. Wir werden sehen, dass erst mit dem Aufkommen experimenteller Verfahren im 17. Jahrhundert Schüler von Galileo Galilei zeigen konnten, dass der Glaube an einen „Horror vor dem Vakuum“ auf einer falschen Interpretation der Phänomene beruhte. Der scheinbare Horror war das Ergebnis von zehn Tonnen Atmosphäre, die auf jeden Quadratmeter an der Erdoberfläche drücken und damit die Luft in jede verfügbare Nische pressen.

Wie wir sehen werden, kann man die Luft aus Behältern absaugen und ein Vakuum erzeugen. Aristoteles hatte Unrecht; zumindest ist das die Schlussfolgerung, sofern es nur um die Frage nach einem Entfernen der Luft geht. Mit dem

Fortschritt der Wissenschaften und der Erweiterung unserer Sinnespalette um immer ausgeklügeltere Instrumente wurde deutlich, dass wir bei Weitem nicht nur die Luft entfernen müssen, bevor wir eine wirkliche Leere erhalten. Nach den Erkenntnissen der heutigen Wissenschaft ist es prinzipiell unmöglich, eine vollständige Leere zu schaffen. Vielleicht hatte Aristoteles also doch nicht Unrecht. Trotzdem verwenden die Wissenschaftler auch heute gerne das Konzept des Vakuums. In der modernen Physik möchte man jedoch verstehen, was genau die Natur des Vakuums und das Wesen von Zeit und Raum in den verschiedenen Dimensionen ist.

Die von mir in aller Unschuld gestellte Frage erscheint noch rätselhafter vor einem Hintergrund, den damals noch niemand kannte: Seit dem „Big Bang“, dem Urknall vor ungefähr 14 Milliarden Jahren, dehnt sich unser Universum aus. Da weder das Sonnensystem noch die Erde oder die Atome, aus denen wir bestehen, sich ausdehnen, sagt man gemeinhin „der Raum selbst“ dehne sich aus. Auf die Frage „Wohin dehnt er sich aus?“ kommen wir noch zu sprechen, doch die alte Frage erscheint nun in einem neuen Licht: Wenn man alles aus dem Universum entfernen könnte, würde sich der Raum immer noch ausdehnen? Das wiederum führt uns zu der Frage, was denn einen leeren Raum definiert. Gibt es einen Raum unabhängig von den Dingen? Angenommen, man könnte alle Planeten, Sterne und sämtliche ansonsten noch vorhandene Materie entfernen, würde der leere Raum bleiben, oder hätte sich mit der Entfernung der Materie auch der Raum aufgelöst? Beginnen wir also unsere Suche mit einem Überblick, welche Einsichten weisere Köpfe der Geschichte als Antwort auf unsere Fragen anbieten. Können wir alles aus dem Raum herausnehmen, und wenn ja, was bleibt dann übrig? Weshalb ereignete sich der Big Bang nicht früher? Was tat Gott vor dem Tag der Schöpfung, oder gab es immer schon etwas, das schließlich zu dem wurde, was wir sind?

Frühe Ideen über das Nichts

Das Paradoxon einer Schöpfung aus dem Leeren, von Sein und Nichtsein, hat alle bekannten Kulturen fasziniert. Schon 1 700 Jahre vor Christus behauptet der Schöpfungsgesang der Rigveda:

*Weder Nichtsein noch Sein war damals;
nicht war der Luftraum noch der Himmel darüber.
Was strich hin und her? Wo?²*

Solche Fragen wurden auch von den Philosophen im antiken Griechenland debattiert. Um 600 v. Chr. leugnete Thales die Existenz des Nichts: Für Thales kann Seiendes nicht aus dem Nichts entstehen, noch kann es zum Nichts verschwinden. Dieses Prinzip wandte er auch auf das Universum an: Der Kosmos kann nicht aus dem Nichts entstanden sein.

Das Konzept des Nichts wurde mit den Gesetzen der Logik konfrontiert, und Thales stellte die Frage: Macht das Denken über das Nichts es zu Etwas? Die griechischen Logiker argumentierten, dass es das Nichts nur geben kann, wenn es niemanden gibt, der darüber nachdenkt. Meine Frage, ob es das Nichts geben kann, wenn niemand davon weiß, wurde offenbar vor rund 3 000 Jahren bejahend beantwortet, obwohl es sich nach meinem Eindruck eher um eine axiomatische Behauptung handelt als um ein überzeugendes Argument. Ich setzte meine Suche fort, doch anscheinend wurde damals das Nichts nie anders definiert als die Abwesenheit von Etwas.

Nachdem er sich mit dem Nicht-Seienden auseinandergesetzt hatte, beschäftigte sich Thales mit der Natur des Seienden. Er sagte erfolgreich die Sonnenfinsternis vom 28. Mai 585 v. Chr. vorher, was nicht nur eine beachtliche Leistung war, sondern auch von seinen besonderen Fähigkeiten zeugt. Dementsprechend waren seine Ideen auch sehr hoch

angesehen. Da nach seinen Vorstellungen das Seiende nicht aus dem Nicht-Seienden entstanden sein konnte, musste es eine alles durchdringende Substanz geben, aus der sich die Dinge materialisiert haben. Die Frage „Woher kam alles?“ führte zu einer anderen Frage: Wenn wir alles aus einem Raumgebiet entfernen, bleibt dann das urzeitliche „Nichts“ übrig? Thales unterbreitete auch für dieses Geheimnis seine Lösung: Sein Hauptverdächtiger war das Wasser. Eis, Wasserdampf und Flüssigkeit sind verschiedene Manifestationen von Wasser, und so vermutete Thales, dass Wasser noch eine Unzahl anderer Formen annehmen kann. Er glaubte beispielsweise, dass auch die Felsen eine besondere Form von kondensiertem Wasser seien. Da das Wasser in Pfützen scheinbar verschwinden und später als Regen vom Himmel fallen kann, entstand die Vorstellung von Verdampfung und damit auch von einem Wasserzyklus. Einen wirklich leeren Raum erhält man nach Thales, wenn alle Materie ihre ursprüngliche Form annimmt: ein Ozean aus flüssigem Wasser. Wasser birgt in sich somit jede mögliche Form der Materie.*

Nach 78 bewusst erlebten Jahren kehrte Thales im Jahre 548 v. Chr. wieder in den Zustand des ewig Leeren zurück, aber die Vorstellung von einer allgegenwärtigen formlosen Essenz oder auch „Urmaterie“ lebte weiter. Die Natur dieser Urmaterie wurde in der Folgezeit heiß diskutiert. Auf der einen Seite bestand Heraklit darauf, dass es sich dabei um Feuer handeln müsste. Aber woher kommt das Feuer? Seine Antwort lautete, es sei ewig und könne daher mit der Vorstellung einer Gottheit oder einem Schöpfer der Welt in Verbindung gebracht werden. Demgegenüber handelte es sich für Anaximenes bei der Urmaterie um Luft. Von der Luft können wir uns vorstellen, dass sie sich im Gegensatz

* 3 000 Jahre später ist diese Idee natürlich überholt, doch die heutigen Vorstellungen vom Vakuum enthalten immer noch ein vergleichbares Konzept: einen unendlich tiefen „See“ aus Elementarteilchen; siehe Kapitel 7.

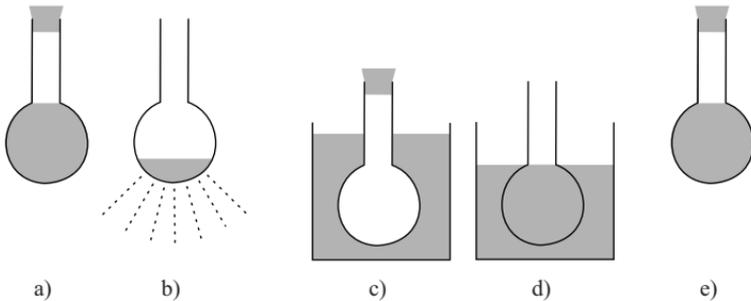


Abb. 1 a) Ein Kolben mit Löchern enthält Wasser. Ist der Kolben an der oberen Öffnung geschlossen, bleibt das Wasser im Kolben, wird er geöffnet (b), tritt das Wasser aus den Löchern aus. c) Der leere Kolben ist geschlossen und wurde in einen Wasserbehälter getaucht; kein Wasser tritt ein. d) Öffnet man den Kolben, dringt Wasser durch die Löcher ein. e) Wir schließen den Kolben wieder, heben ihn aus dem Wasserbehälter, und wiederum tritt kein Wasser aus der Kugel aus.

zu Wasser unendlich ausdehnt. Ihre Allgegenwärtigkeit macht sie daher zu einem bevorzugten Kandidaten für die universelle Quelle der Materie.

Um die Mitte des fünften vorchristlichen Jahrhunderts stellte sich Empedokles die Frage, ob es sich bei Luft um eine Substanz oder leeren Raum handele. Die ersten Ansätze experimenteller Untersuchungen bezogen sich auf eine Vorrichtung, die man Hydra nannte. Dabei handelte es sich um einen Glaskolben, der an einem Ende offen ist und am anderen Ende einen kugelförmigen Korpus mit Löchern hat, aus denen Wasser austreten kann. Wird die obere Öffnung mit dem Finger verschlossen, tritt kein Wasser mehr aus. Taucht man eine leere Hydra in einen Wasserbehälter ein, dringt das Wasser durch die Löcher ein und füllt den Kolben, solange das andere Ende offen bleibt. Wird es jedoch wieder verschlossen, tritt kein Wasser mehr ein, und es kann auch keine Luft austreten. Das Experiment zeigt, dass Wasser und Luft denselben Raum einnehmen können. Jedoch kann kein Wasser eindringen, bevor die Luft nicht entwichen ist; Luft ist somit eine Substanz und kein leerer Raum. Erst im 17. Jahrhundert konnte Torricelli diese Beobachtungen wirklich erklären.

Empedokles erweiterte das Konzept der Urmaterie zu den vier bekannten Elementen: Luft, Wasser, Feuer und Erde. Er entwickelte auch erste einfache Vorstellungen von Kräften: Für ihn handelte es sich dabei um Liebe und Hass, Vorläufer der Anziehung und Abstoßung. Er war sicherlich der erste Denker, der zwischen Materie und Kräften unterschied, aber auch er bestand darauf, dass es so etwas wie einen leeren Raum nicht geben kann.

Viele Formen von Materie sind körnig. Eng gepackte Kugeln haben Zwischenräume. Damit in den „leeren“ Zwischenräumen kein wirklich Leeres entsteht, entwarf Empedokles das Konzept des Äthers. Äther ist leichter als Luft, er kann alle Zwischenräume und sogar den gesamten Raum ausfüllen. Äther kann überall hindringen und verhindert so das Vakuum. Empedokles stellte sich sogar vor, dass der allgegenwärtige Äther eine Wirkung von einem Körper auf einen anderen übertragen kann. In moderner Sprechweise gleicht das einem Gravitationsfeld.

Anaxagoras bestritt ebenfalls die Möglichkeit eines leeren Raumes sowie der Schöpfung von Etwas aus dem Nichts. Für ihn war die Schöpfung eine Ordnung, die aus dem Chaos entstanden ist, und weniger ein materielles Universum, das sich aus dem Nichts entwickelt hat. Ordnung aus Chaos bedeutet, dass sich Dinge entwickeln und verändern können, beispielsweise kann Nahrung zu körpereigener Substanz werden. Diese Permanenz der elementaren Bausteine, während sich gleichzeitig die höheren Strukturen verändern können, führte zur Vorstellung von „Saatkörnern“ oder „Keimen“ und zur Geburt des Atomismus. Für Anaxagoras gab es kein kleinstes Atom, keine Teilbarkeitsgrenze der Materie, und daher bestand für ihn auch nicht die Notwendigkeit, sich über die Zwischenräume dicht gepackter Kugeln Gedanken zu machen. Er brauchte keinen Äther, um die Zwischenräume auszufüllen.

Epikur (341–270 v. Chr.), wie schon Leukipp und Demokrit vor ihm, leugnete ebenfalls die Möglichkeit der

Entstehung von Etwas aus dem Nichts. Diese Denker werden als die Urväter der Atomtheorie angesehen, also der Idee von kleinen fundamentalen, unteilbaren Körnern, aus denen alle Materie besteht. Hier entstand die Vorstellung von einem leeren Raum, in dem sich die Atome bewegen können. Begründet wurde das Leere damit, dass ein Atom keinen Platz einnehmen kann, an dem sich schon etwas befindet. Damit also Bewegung überhaupt möglich ist, muss es auch leeren Raum geben. Man stellte sich sogar ein unendliches, fast leeres Universum vor, in dem die Atome umherschwirren. Einzelne Atome sind zu klein, um sichtbar zu sein, aber sie finden sich zu sichtbaren makroskopischen Formen zusammen. Die einzelnen Atome sind in ständiger Bewegung, doch insgesamt bilden sie scheinbar ruhende Klumpen. Man könnte dabei an einen Ameisenhaufen denken, der aus der Ferne wie ein unbewegter Hügel aussieht, doch bei näherer Betrachtung aus Millionen von winzigen Individuen besteht, die in ständiger Bewegung sind.

Auch wenn die Vorstellungen der Atomisten unserem heutigen Bild der Materie eher entsprechen, setzten sich für rund 2 000 Jahre die entgegengesetzten Ideen von Aristoteles durch und beherrschten die allgemeine Meinung. Für Aristoteles hätte das Leere absolut gleichförmig und symmetrisch sein müssen, und man hätte damit nicht zwischen vorne und hinten, rechts und links, oben und unten unterscheiden können. Diese Idee erscheint auch in der Schöpfungshymne der Rigveda:

Gab es denn ein Unten?

*Gab es denn ein Oben?*²

Nach diesem Denkmuster kann ein Gegenstand weder fallen noch sich bewegen, er kann sich nur in einem Zustand der Ruhe befinden. Die Vorstellung eines leeren Raumes wurde schließlich zur Grundlage der Newton'schen Mechanik. Aristoteles schloss die Existenz des Nichts aus, und er