

Das Vakuum



Schriftliche Arbeit im Seminarkurs
„Unendlichkeit“
am Kolleg St. Blasien
im Schuljahr 02/03
betreuende Lehrer: J. Rudolf, P. Lebrecht

Vorgelegt von:
Andreas Masuch
Im Weiherfeld 34
79733 Görwihl
Andreas.Masuch@t-online.de

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|----|
| Das Vakuum | 1 |
| Inhaltsverzeichnis | 2 |
| Zusammenfassung | 3 |
| Definition des Vakuums..... | 5 |
| Geschichte des Vakuums | 7 |
| Die Eleaten | 7 |
| Die Atomisten..... | 7 |
| Aristoteles..... | 8 |
| Empedokles | 10 |
| Evangelista Torricelli | 11 |
| Blaise Pascal | 13 |
| Das Gewicht des Vakuums..... | 14 |
| Otto von Guericke..... | 15 |
| Die Magdeburger Halbkugeln | 17 |
| Epilog zur Geschichte des Vakuums..... | 18 |
| Die Nutzung des Vakuums..... | 19 |
| Das perfekte Vakuum, erreicht? | 20 |
| Die Heisenbergsche Unschärferelation..... | 21 |
| Ort und Impuls | 23 |
| Nullpunktsenergie | 23 |
| Extrapolation..... | 24 |
| Energie und Zeit..... | 24 |
| Quantenschaum..... | 25 |
| Fazit der Unschärferelation | 26 |
| Die Quantenmechanik..... | 26 |
| Der Casimir Effekt..... | 28 |
| Forschung am Vakuum | 30 |
| Ausblicke zum Vakuum | 31 |
| Epilog | 32 |
| Quellenangaben | 33 |
| Bildnachweis | 34 |
| Anhang | 35 |
| Erklärung :..... | 36 |

Zusammenfassung

Diese Seminararbeit handelt von der Leere, dem absoluten Nichts oder einfach nur dem „Vakuum“. Sie befasst sich mit der Geschichte des Vakuums und der Entwicklung des Begriffes Vakuum im Laufe der Zeit. Obwohl dies eine naturwissenschaftliche Arbeit ist, kann sie trotzdem von jedem Nichtphysiker gelesen werden. Es werden zwar tiefergehende, physikalische Gesetze und deren Interpretation im Text behandelt, doch wurde bei der Erstellung der Arbeit großer Wert auf eine allgemein verständliche Umschreibung der Fachtermini gelegt. Darüber hinaus werden zusätzlich Anwendungen und hypothetische Theorien zum Vakuum erläutert. Die Arbeit hat das Ziel, dem Leser klar zu machen, dass das Vakuum mehr ist als bloß „Nichts“.

Viel Spaß dabei!

Einleitung

Das Vakuum ist nicht leer.

Mit dieser doch recht klaren Feststellung zu Beginn meiner Arbeit möchte ich schon zu Beginn von der weit verbreiteten Vorstellung, das Vakuum enthielte nichts, abrücken. Ganz im Gegenteil, das Vakuum ist erfüllt von Energie in Form von Myriaden von Teilchen. Diese Teilchen sind nicht real, können aber real werden. Die Definition eines jeden Vakuums besagt, es solle so wenig wie nur irgendwie möglich Materie oder Energie enthalten. Doch dies ist einfacher gesagt, als getan. Es ist nämlich physikalisch gesehen nicht möglich alle Energie, sei nun in Form von Materie oder Strahlung, aus einem Raum zu entfernen. Es stellt sich nun die Frage, was sich dagegen stellt? Was verhindert ein völliges Vakuum? Hegt die Natur einen Abscheu gegen das Leere?
Wir werden es sehen!

Definition des Vakuums

Der Begriff Vakuum stammt aus dem Lateinischen und wird von dem Adjektiv *vacuus* abgeleitet und bedeutet frei oder leer.

Im Allgemeinen wird unter dem Begriff „Vakuum“ ein luft- oder auch materiefreier Raum verstanden. Da wir bereits aus der Einleitung wissen, dass es keinen absoluten teilchenfreien Raum geben kann ist diese allgemeine Definition des Vakuums ungenau und beschreibt ein in der Praxis nicht zu erreichendes ideales Vakuum.

Um dieses Problem der Begriffsfrage zu lösen hat das Deutsche Institut für Normung (kurz: DIN) die Definition des Begriffs Vakuum festgelegt:

„Vakuum heißt der Zustand eines Gases, wenn in einem Behälter der Druck des Gases und damit die Teilchenzahldichte niedriger ist als außerhalb oder wenn der Druck des Gases niedriger ist als 300 mbar, d.h. kleiner als der niedrigste auf der Erdoberfläche vorkommende Atmosphärendruck“³

Kurz gesagt: Wenn man aus einem Behälter, auch Rezipient genannt, einen Teil der Luft entfernt und der Druck im Inneren unterhalb des äußeren Druckes, des Normaldruckes von 1013 mbar⁴ auf Meereshöhe, liegt, hat man schon ein Vakuum erzeugt!

Um nun in der experimentellen Physik besser zwischen den qualitativ verschiedenen Vakua unterscheiden zu können wurde das Vakuum in so genannte Vakuumbereiche unterteilt. (*siehe nächste Seite*)

Durch diese Einteilung des Vakuums lassen sich die einzelnen Vakua besser klassifizieren.

Neben dieser Definition der klassischen Physik, gemeint ist der Teil der Physik der sich nicht nur auf quantenmechanische Abläufe beschränkt sondern auch die Mechaniklehre Newtons⁵ mit einbezieht, gibt es noch die Definition der modernen Physik, die sich auf die Quantenmechanik und die allgemeine Relativitätstheorie Albert Einsteins stützt.

Sie definiert das Vakuum als einen Raum mit geringstmöglicher Energie. Erzeugt wird dieser Raum indem man einem Raumgebiet alle Energie, sei es nun in Form von Masse⁶ oder Strahlung in Form verschiedener elektromagnetischer Wellen, wie

³ DIN-Norm 28.400 aus der Vakuum-Mappe von Desy – siehe Anhang

⁴ DIN-Norm 1343 Normaldruck = 1,01325 bar oder 1013,25 mbar

⁵ Henning Genz, Die Entdeckung des Nichts, „Newtons Raum und Zeit“, Seite 183

⁶ $E = m \times c^2$ nach der ART Albert Einsteins

zum Beispiel der Radio- oder Röntgenstrahlen, entfernt so weit es in Einklang mit den Naturgesetzen möglich ist.

Wie ich schon in der Einleitung versucht habe klar zu machen, können wir aus unterschiedlichen Gründen, die ich noch im Einzelnen näher beschreiben werde, nicht alle Energie aus einem Gebiet entfernen. Dies ist schlichtweg nicht möglich! Das physikalische Vakuum⁷ ist erfüllt von „virtuellem Elementarteilchen“⁸, sie heißen virtuell weil sie nur für kurze Zeit in die reelle Welt gelangen. Aber dazu später mehr bei der Heisenbergschen Unschärferelation, die für das Verständnis der quantenmechanischen Definition des Vakuums unerlässlich ist.

| Bezeichnung | Druck in Millibar | Verwendung / Teilchenzahl |
|------------------------|-------------------------|---|
| Normaldruck | 1000 | Atmung / bei 20 Grad Celsius Temperatur 5×10^{19} Moleküle pro Kubikzentimeter |
| Grob- und Mittelvakuum | 1000 bis 100 | Staubsauger, Melkmaschinen, Vakuumverpackungen |
| Feinvakuum | 1 bis 10^{-3} | Einfache chemische Verfahren und Beschichtungen; Metallurgie |
| Hochvakuum | 10^{-3} bis 10^{-6} | Wie Feinvakuum, Glühlampen, Fernröhren |
| Ultrahochvakuum | unter 10^{-6} | Forschungszwecke, Chipfertigung, Beschleuniger für Elementarteilchen / unter 10^{10} Moleküle pro Kubikzentimeter |

9

7

⁸ <http://www.marcoschwarz-online.de/einstein/algrelat.htm> oder Henning Genz, Die Entdeckung des Nichts, Seite 253

⁹ Vakuumbereiche, Henning Genz, Die Entdeckung des Nichts, Seite 180

Geschichte des Vakuums

Schon seit der Antike beschäftigt das Nichts, das Leere die Menschen. Sind es heutzutage eher Physiker als Philosophen die sich mit dem Thema befassen waren es vor rund 2500 Jahren doch noch allein die Philosophen die sich mit diesem Thema beschäftigten. Schon die Vorsokratiker im alten Griechenland oder besser gesagt in seinen Kolonien unterschieden das Seiende vom Nichtseienden und Werdenden.

Die Eleaten

Doch erst mit dem Eleaten Parmenides begann sich die Kontroverse um das existierende oder eben doch nicht existierende Nichtsein weiter zu entwickeln.

Die Eleaten glaubten an eine zweifache Substanz, die eine die des wahrhaft Seienden, die durch Denken erfassbar war, und die andere die des Werdenden, die nur durch die Sinne wahrnehmbar waren. Sie wollten das Werdende nicht als etwas Seiendes anerkennen sondern nur als etwas scheinbar Seiendes.

Das erklärt auch warum Parmenides dem Seienden eine Wahrheit und im Gegensatz dazu dem Werdenden nur eine Meinung zuordnet.

Für ihn gibt es keine Erscheinungen und keinen Wandel da für ihn kein Weg vom Seienden zu Werdenden führt. Für ihn ist das Seiende unwandelbar und gleicht damit Wigners Einteilung unserer Welt in unwandelbare Naturgesetze und Anfangsbedingungen.¹⁰ Mit dem einen wichtigen Unterschied, dass die Naturgesetze, im Gegensatz zum Seienden des Parmenides, auch in die Welt der Erscheinungen wirken. Und wie genau sie das letztendlich tun definiert die Naturwissenschaften. Die griechische Philosophie kann dabei nur eine Vorstufe sein, wohingegen die Ansichten Parmenides den Naturwissenschaften widersprechen.

So kommt Parmenides zu dem Schluss, dass es nur das Seiende gibt. Interessant ist wie er dies begründet: „Nur das Seiende gibt es. Denn es ist möglich, dass es wirklich vorhanden ist; das Nichtseiende ist unmöglich“¹¹

Die Atomisten

Anders sahen dies die beiden Naturphilosophen des 5. Jahrhunderts vor Christus:

¹⁰ Henning Genz, Die Entdeckung des Nichts, „Parmenides: Sein, Denken und Sprache, Seite 78

¹¹ Henning Genz, Die Entdeckung des Nichts, „Parmenides: Sein, Denken und Sprache, Seite 78

Der griechische Naturphilosoph Leukipp (* um 450v. Chr., † um 370 v. Chr.) und sein Schüler Demokrit (* um 460 v. Chr., † um 375 v. Chr.) waren beide der Meinung, dass sich die Welt in die unteilbaren Atome (gr. atom = unteilbar) und den leeren Raum, in dem sich jene bewegten, aufteilen ließe. Sie waren damit Vertreter der Atomistik und wurden der Lehre nach auch Atomisten genannt.

Demokrit hat kein Problem mit dem Gedanken an die Leere. Ganz im Gegenteil, er war der Überzeugung, dass es das Leere geben müsse, da es ja auch Bewegung gebe. Seiner Ansicht nach könne sich Materie nur deshalb bewegen, weil sie zuvor den leeren Raum bereits eingenommen habe.¹² Demokrit braucht also den leeren Raum eigentlich nur um Platz für die Atome darin und Bewegung ohne Widerstand zu haben.¹³ Nebenbei sei noch erwähnt, dass die Denkmodelle der Atomisten weit mehr naturwissenschaftlich erscheinen. Demokrit geht davon aus, dass Sinneseindrücke die Farben und Geschmäcker wahrnehmen eigentlich nur Aspekte dessen sind was wirklich, wenn auch unsichtbar, geschieht: Atome bewegen sich, bilden miteinander Aggregate und lösen sich wieder voneinander. Seine Schlussfolgerung lautet, dass es in Wirklichkeit nur Atome und das Leere gibt.¹⁴

Aristoteles

Ganz anderer Meinung war da Aristoteles (*384 v.Chr., † 322 v. Chr.).

Als griechischer Philosoph vertrat er im Gegensatz zu Demokrit und den anderen Atomisten eine andere Meinung: Es gibt nicht Nichts!

Es passte mit seiner Vorstellung einer endlichen Welt nicht zusammen.

Die Welt war nach seiner Vorstellung in einer Kugel, der so genannten Sphäre der Fixsterne, eingebettet. Jenseits der Fixsterne gibt es nichts, nicht einmal leeren Raum. Nach seiner Definition von leeren Raum, ist ein leerer Raum ein physisch nicht ausgefüllter Platz, der aber die Fähigkeit besitzt ausgefüllt zu werden.¹⁵

Und da es offensichtlich ist, dass es hinter der Grenze der Welt, dem Fixsternhimmel, keine Körper gibt, kann es logischerweise auch keinen leeren Raum geben.

Um diese Behauptung, von der Nichtexistenz des leeren Raumes, weiter zu untermauern, bediente sich Aristoteles zahlreicher Argumente von denen ich drei aufgreifen möchte:

¹² aus der Vakuum-Mappe von Desy – „Geschichte des Vakuums“ – Seite 12

¹³ Henning Genz, Die Entdeckung des Nichts, „Die frühen Atomisten“, Seite 87

¹⁴ Henning Genz, Die Entdeckung des Nichts, „Atome und leerer Raum“, Seite 87

¹⁵ Henning Genz, Die Entdeckung des Nichts, „Raum und Bewegung“, Seite 100

Erstes Argument und zu gleich auch das bekannteste war, dass ein Stein im leeren Raum nicht „wissen“ könne wohin er fallen solle, da im leeren Raum weder oben noch unten angegeben sei.¹⁶ Das sei eine unertragbare Konsequenz und deshalb könne es kein Vakuum geben.

Ein weiteres Argument lieferte Aristoteles mit der Überlegung, wieso ein Objekt das im leeren Raum zur Bewegung gebracht wurde, je stehen bleiben sollte. Denn warum solle das eher hier als dort im Leeren geschehen. Folglich könne ein Körper im leeren Raum nur in Ruhe verharren oder bis ins Unbegrenzte weiterbewegt werden.¹⁷ Die Physik des Aristoteles aber sagt, das jegliche Bewegung ohne eine Kraft die auf sie wirkt irgendwann auch einmal zum Stillstand kommen muss. Daraus ergibt sich, dass die andauernde Bewegung im Leeren absurd ist und es deshalb auch kein Leeres geben kann.

Das dritte Argument beschäftigt sich wie das erste mit der Schwerkraft. Natürlich könnte Aristoteles mit diesem Begriff nichts anfangen. Er interpretiert sie in seinen Gedankenspielen als eine vorgegebene Richtung die der Körper im Raum folgt. Er untersucht den freien Fall unter dem Einfluss der Schwerkraft im ansonsten leeren Raum. Seine Physik besagt das schwerere Körper schneller fallen als leichtere. Als entscheidenden Faktor nennt er das Verhältnis der Größe eines Körpers zu seinem Gewicht. Er überträgt nun sein Modell auf den leeren Raum und kommt zu dem Schluss, dass es schlichtweg unmöglich sei.

Denn ein schwerer Körper fällt nämlich nur schneller weil er das Medium (gemeint ist hier die Luft; wobei sie als solche erst viel später wahrgenommen wird) besser und damit auch schneller zerteilt als das ein leichterer Körper tun würde. Da aber nun im Leeren dieses Medium nicht existiert müssten beide Körper gleich schnell fallen (was sie ja in Wirklichkeit auch tun). Daraus folgert Aristoteles, dass es schlichtweg unmöglich sei, dass die beiden Körper gleich schnell fallen und schließt dadurch wiederum die Existenz eines Vakuums aus. Bei der aufmerksamen Betrachtung seiner Argumentation fällt auf, dass Aristoteles zwar eine korrekte physikalische Wahrheit genannt hat (die von der Zerteilung der Luft), diese aber kurz darauf verneint. Daran lässt sich gut erkennen wie fest der Glaube an die Nichtexistenz eines Vakuums und damit der Erhalt seines Weltbildes für Aristoteles war.

¹⁶ Geo-Magazin, Nr.2/Februar 1999, „Der lange Kampf ums Nichts“, Seite 68

¹⁷ Henning Genz, Die Entdeckung des Nichts, „Raum und Bewegung“, Seite 99

So war es für ihn auch viel einfacher die Bewegung im Gegensatz zu den Atomisten nicht durch die Atome in der Leere sondern durch Umschichtungen und Platzwechsel zu erklären. Für ihn ist jeder Ort mit Stofflichem ausgefüllt.¹⁸

Die Gedanken des Aristoteles prägten noch lange Zeit bis ins 17. Jahrhundert n. Chr. die Wissenschaft. So übernahm dann auch die durch die katholische Kirche im Mittelalter geprägte Naturwissenschaft die Auffassung, es könne kein Vakuum geben und lieferte noch gleich die Begründung dazu: das „horror vacui“, die Abscheu der Natur vor der Leere.¹⁹ Jeder der dies in Frage stellte lief Gefahr von der Inquisition betroffen zu werden. Diese „Abscheu der Natur vor dem Leeren“ rührt nicht zu letzt auch von dem Experiment Empedokles her.

Empedokles

Auch Empedokles (*483 v. Chr., † 424 v. Chr.) vertrat wie später Aristoteles die Meinung, das es kein Leeres gebe. Er dachte auch darüber nach ob Luft ein Stoff sei um so die mögliche Vorstellung von Luft als leeren Raum endgültig zu widerlegen. Dies bezüglich brachte er als erster eine experimentelle Beobachtung mit in eine philosophische Diskussion ein.²⁰ An der Beobachtung eines Wasserhebers, einer so genannten Klepshydra, bewies er, dass Luft eine Substanz ist. Seine Beobachtung lässt sich in vier Schritte unterteilen: Ist erstens der Hals der Klepshydra beim Eintauchen ins Wasser geschlossen (Abb. 1a), dringt in sie kein Wasser ein. Wird zweitens der Hals geöffnet (Abb. 1b) passieren zwei Dinge: Erstens dringt Wasser von unten durch die Öffnungen in das Gefäß ein. Zweitens strömt die Luft spürbar durch die Öffnung am Hals aus dem Gefäß

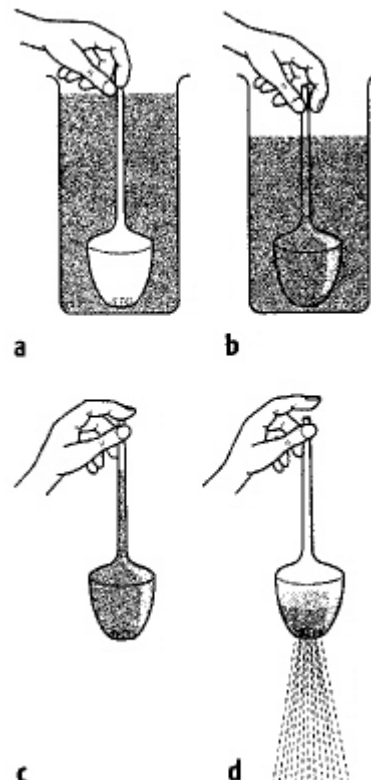


Abb. 1 Experiment mit einem Wasserheber

hinaus. Die Tatsache, dass man den Luftstrom beim Austritt spüren konnte, war schon Beweis genug, dass Luft eine Substanz und kein eigenschaftsloses Nichts ist. Empedokles begründet dies damit, dass Luft und Wasser nicht gleichzeitig im Gefäß

¹⁸ der Vakuum-Mappe von Desy – „Geschichte des Vakuums“ – Seite 12

¹⁹ der Vakuum-Mappe von Desy – „Geschichte des Vakuums“ – Seite 12

²⁰ Henning Genz, Die Entdeckung des Nichts, „Die Klepshydra: Ein Experiment!“, Seite 80

sein können und dass erst die Luft entweichen muss, damit Wasser in das Gefäß nachströmen kann. Die dritte Teilbeobachtung ist wesentlich spektakulärer! Wird nun die Klepshydra mit verschlossenem Hals aus dem Wasser gezogen bleibt das Wasser im Wasserheber (Abb. 1c). Empedokles erklärt dies richtig durch die Substanzen Luft und Wasser. Die Luft hindert das Wasser daran aus dem Gefäß zu strömen. Erst wenn der Hals der Klepshydra wieder freigegeben wird (Abb. 1d), kann die Luft von oben nachströmen und gleich wie das Wasser im Behälter vorhin die Luft verdrängte, nun die Luft das Wasser aus dem Wasserheber drücken. Doch leider sind seine Ausführungen für diese Teildeutung des Experimentes zu ungenau um den Druck der Luft für die Beobachtungen verantwortlich zu machen. Dies übernahmen rund zweitausend Jahre später Toricelli, Pascal oder auch Otto von Guericke, denen Geräte aus Glas zur Verfügung standen. Damit konnten sie anders als Empedokles sehen, wie hoch die Flüssigkeit, sei es nun Wasser oder auch Quecksilber, im Versuchsgerät stand. Denn Empedokles hatte, anders als es die Abb. 1 vermuten lässt, keine Möglichkeit in seinen Versuchsapparat hineinzublicken. Aus diesem Versuch leitete man nun die folgenden zweitausend Jahre ab, dass die Natur durch die Substanz Luft versucht Flüssigkeiten, daran zu hindern aus einem Gefäß auszufließen und dadurch ein Vakuum zu bilden. Dies geschehe zum einen dadurch, dass die Luft die Flüssigkeit daran hindert aus einem Behälter auszufließen zum anderen das sie beim Ausfließen des Wassers sofort dessen Platz einnimmt. Dieses Phänomen bezeichnete man von nun an als „horror vacui“.

Evangelista Torricelli



Abb. 2 Portrait von Evangelista Torricelli

Das unanfechtbare Paradigma „vom Abscheu der Natur von dem Leeren“ hielt sich zweitausend Jahre lang bis es im Jahre 1644 den Galilei-Schülern Evangelista Torricelli (*15.10.1608, † 8.1.1642) und Vincenzio Viviani (*5.4.1622, †22.9.1703)

gelang experimentell ein Vakuum zu erzeugen und damit das Paradigma des „horror vacui“ in Frage zu stellen.

Sie füllten dazu eine an einem Ende geschlossene Glasröhre vollständig mit Quecksilber und stellten sie anschließend kopfüber ebenfalls in ein Bad aus Quecksilber (Abb. 3)

Das Quecksilber fiel bis auf eine Höhe von 760 Millimeter zurück und der daraus freigewordene Raum oberhalb der Quecksilbersäule war das erste experimentell erzeugte Vakuum! Torricelli nahm richtig an, dass der Grund für das

Entstehen des Vakuums dem Gewicht oder besser gesagt dem Druck der umliegenden Luft außerhalb des Gefäßes zu zuschreiben war. Dies wurde vier Jahre später von Blaise Pascal in einem anschaulichen Versuch wissenschaftlich bewiesen.

Ein weiterer leicht modifizierter Versuch Torricellis ist nicht minder wichtig, besonders auch im Hinblick auf die Widerlegung des „horror vacui“. Dabei untersuchte Torricelli die Abhängigkeit des eingeschlossenen

Volumens des leeren Raumes auf die Höhe der Quecksilbersäule. Dazu ging er wieder gleich vor, wie bei seinem ersten Versuch (Abb. 3) nur

das er diesmal Röhren von unterschiedlicher Form, Länge und Neigung nahm (Abb. 4). Es schien nun nur all zu logisch, dass die Höhe des Quecksilbers nicht von dem in der Röhre befindlichen Vakuum abhing, sondern allein vom Gewicht der Luft außerhalb der Röhre. So war nun auch die Theorie, dass die „Furcht der Natur vor dem Vakuum“ für die Steighöhe in der Röhre verantwortlich sei, widerlegt.

Doch hinderte dies einige Leute, darunter auch der französische Philosoph und Naturwissenschaftler Renè Descartes (*31.3.1596, † 11.2.1650), nicht daran weiter an der Existenz des Vakuums zu zweifeln. Er erkannte zwar an, dass der Luftdruck für die Steighöhe der Flüssigkeit in der Röhre verantwortlich sei, verneinte aber zu gleich das Vakuum. „Wenn es irgendwo ein Vakuum geben kann, dann nur in Torricellis Kopf“, verkündete Descartes. Den nun aufkommenden Vorwurf, Dämpfe des Quecksilbers könnten für die Absenkung desselben im Rohr verantwortlich sein, widerlegte einige Jahre später der französische Philosoph und Physiker Blaise Pascal.

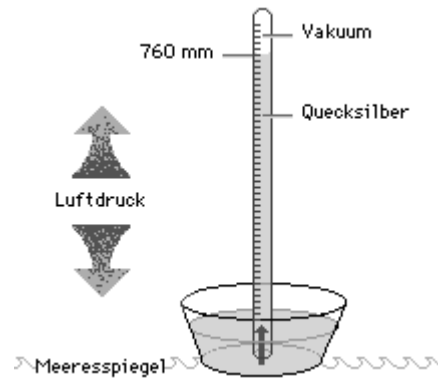


Abb. 3 Torricellis berühmter Quecksilberversuch



Abb. 4 Die Höhe des Quecksilbers im Experiment ist unabhängig von Form, Neigung und Länge des Rohrs

Blaise Pascal

Bei einem öffentlichen Versuch vor 500 Schaulustigen ließ Blaise Pascal (*19.6.1623, †19.8.1662) ein 12 Meter langes mit Wasser aufgefülltes Rohr und ein anderes ebenfalls 12 Meter langes aber diesmal mit Rotwein aufgefülltes Rohr an schwenkbaren Schiffsmasten festmachen um sie dadurch besser aufrichten zu können.

Bevor er dies jedoch tat, ließ er die Anwesenden raten in welchem der beiden Röhren, die Flüssigkeit wohl niedriger stehen würde und damit auch ein größeres Vakuum haben sollte. Da unter den Anwesenden die einhellige Meinung bestand, der Wein würde mehr „Geist“ also auch mehr Dämpfe enthalten, als das vergleichbare Wasser in der anderen Röhre, müssten die Dämpfe in der Röhre mit dem Wein mehr Platz einnehmen und folglich die Weinsäule deutlich niedriger sein als die mit Wasser aufgefüllte Röhre. Dem war aber nicht so!

Wegen dem Alkoholgehalt des Weines war auch gleichzeitig die Dichte geringer als die des Wassers²¹. Und somit wurde die Weinsäule deutlich höher vom Luftdruck angehoben als beispielsweise das Wasser. Die mit Rotwein aufgefüllte Röhre besaß zum Erstaunen der Umstehenden ein erheblich kleineres Vakuum als die mit Wasser aufgefüllte Röhre. Blaise Pascal schloss nun daraus, dass sowohl über dem Wasser als auch über dem Quecksilber oder dem Wein in der Röhre ein luftleerer Raum sei. Dies stimmt zwar nicht hundertprozentig, doch der wirklich existierende Dampfdruck der verwendeten Flüssigkeit ist im Hinblick auf den Außendruck der Luft auf die Flüssigkeit zu vernachlässigen²².

Pascal möchte einen weiteren Versuch durchführen lassen um seine Theorie des Luftdrucks als Ursache für das Vakuum zu bestätigen. Deshalb bittet er seinen Schwager



Abb. 5 zeigt Pascals Schwager Perrier bei der Durchführung des Torricelli-Experiments auf dem Berg Puy de Dôme

²¹ der Vakuum-Mappe von Desy – „Geschichte des Vakuums“ – Seite 12

²² Henning Genz, Die Entdeckung des Nichts, „Wasser und Wein“, Seite 151

Perrier bei sich zu Hause in Clermont-Ferrand einmal im Tal seinen Quecksilberversuch und ein anderes Mal auf dem 850 Meter höher gelegenen Berg Puy de Dôme durchzuführen²³. Dabei stellt sich heraus, dass die Quecksilbersäule am Fuß des Berges 8 Zentimeter höher steht als oben. Dies belegt, was Pascal vermutet hatte. Er ging davon aus, dass mit zunehmender Höhe die Luftmassen abnehmen und so weniger Druck auf das Quecksilber auf dem Berg drückt als am Fuße des selbigen. Durch die Bestätigung der Versuche seines Schwagers am 19 September 1648²⁴ (Abb. 5) hat Pascal auch gleichzeitig den Luftdruckmesser erfunden! Denn sein Quecksilberbarometer stellte nämlich genau das fest. Damit hatte man sogleich auch den ersten Luftdruckmesser erfunden! Auch diese Feststellung führte zu einigen Kontroversen. Denn sie ließ den Schluss zu, dass die Lufthülle unserer Erde endlich sei und demnach im „Himmel“ ein Vakuum herrschen müsste. So sparte der Jesuit Noël, als Sprecher Descartes', auch nicht an Kritik und hielt Pascal entgegen, dass wenn der leere Raum unnütz sei ja auch die Werke Gottes auf Erden unnütz sein müssten²⁵. Diese Einwände wurden dann aber im Verlauf der Zeit immer weniger wahr- und ernst genommen.

Das Gewicht des Vakuums

Um das Gewicht des Vakuums zu bestimmen, fährt Pascal in seinem nächsten Versuch wie folgt vor: Er füllt zwei Behälter mit Quecksilber und befestigt in jedem dieser Behälter eine Spritze. Dabei zieht er die eine Spritze (Abb.6 links) genau bis zu der Stelle auf an der die Quecksilbersäule 76 Zentimeter erreicht. Denn er weiß ja inzwischen, dass der Luftdruck in seinen vorigen Experimenten das Quecksilber nur auf jeweils 76 Zentimeter (in

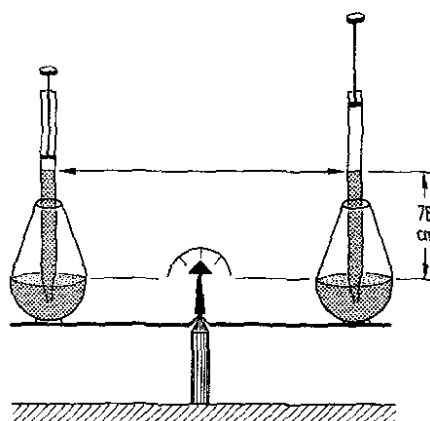


Abb. 6 Waage zur Bestimmung des Gewichts des Vakuums in den Spritzen

²³ Henning Genz, Die Entdeckung des Nichts, „Hängt das Horror Vacui von der Höhe ab?“, Seite 155

²⁴ Henning Genz, Die Entdeckung des Nichts, „Hängt das Horror Vacui von der Höhe ab?“, Seite 156

²⁵ „

Meereshöhe) in der Röhre drücken konnte. Mit der anderen Spritze verfuhr er ähnlich. Der einzige Unterschied besteht darin, dass er die andere Spritze über den entscheidenden Wert von 76 Zentimeter in der Röhre weiter anzieht und so ein größeres Vakuum erzeugt als in der anderen Spritze (von Abb. 6 links also). Nun stellt er beide Apparaturen auf die Waage und zu seiner Zufriedenheit stellt er fest, dass beide gleich viel wiegen. Doch der Eindruck Pascals täuscht. Hätte ihm nämlich eine genauere Waage zur Verfügung gestanden hätte er dem Vakuum ein negatives Gewicht zuweisen müssen, da die Apparatur in der Abb. 6 rechts höher gestanden wäre als jene links²⁶. Daraus hätte Pascal schlussfolgern müssen, dass das Vakuum ein negatives Gewicht besitzen müsse. Dem ist aber nicht so. Das Vakuum besitzt nämlich wie Pascal richtig behauptete kein Gewicht und ist damit schwerelos. Für den Auftrieb der rechten Apparatur in der Abb. 6 ist die erhöhte Verdrängung der Luft durch den weiter nach oben gezogenen Spritzenkolben verantwortlich. Dies zeigt wieder in aller Deutlichkeit, dass eben nicht das Vakuum und das dazugehörige „horror vacui“ für die ihnen zugeschriebenen Ursachen verantwortlich gemacht werden können, sondern allein der Luftdruck.

Otto von Guericke



Abb. 7 Portrait Otto von Guericke

Zur selben Zeit wie Pascal beschäftigte sich damals auch ein gewisser Otto von Guericke (*20.11.1602 in Magdeburg, † 11.5.1686 in Hamburg) mit dem Vakuum

²⁶ Henning Genz, Die Entdeckung des Nichts, „Das Gewicht des Vakuums“, Seite 152

und ganz im Speziellen mit welchen Mitteln man dies am Besten erreichen könne. Zu dieser Zeit waren ihm die Versuche Torricellis und Pascals noch nicht bekannt. Anders wie zum Beispiel Pascal kam Guericke oft auf seine Ergebnisse in dem er von seinen Versuchen spekulative Schlüsse zog. Pascal kam auf dieselben Ergebnisse doch zog er seine Schlüsse erst nach genaueren Experimenten und längeren Überlegungen²⁷. Gemein hatten jedoch beide, dass sie spektakuläre Experimente zur Unterrichtung von Laien liebten. Otto von Guericke war ein begnadeter Ingenieur und wurde später auch zum Bürgermeister der Stadt Magdeburg. Seine erste Pumpe war eine umgebaute Feuerspritze die damals die Feuerwehr benutzte um Brände zu löschen (Abb. 8). Er brachte an ihr zusätzlich zwei Ventile an um sie als Saugpumpe zu benutzen um damit ein Bierfass voller Wasser aus zu pumpen. Denn Guericke war neben Bürgermeister auch Braumeister. Dieser Versuch misslang ihm aber, weil die Halterung der Pumpe abbrach und gleichzeitig Luft in das Fass einzudringen begann (Abb. 9).

Abb. 8 zeigt eine von Guericke umgebaute Feuerspritze

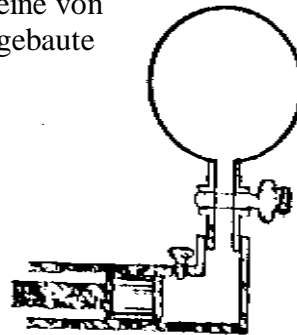


Abb. 9 Zwei Männer scheiterten beim Versuch ein Bierfass leer zu pumpen.

Guericke lässt sich nun eine Metallkugel anfertigen und beginnt diese, ähnlich wie das Fass zuvor, luftleer zu pumpen. Mit der Zeit benötigt er immer mehr Männer um

²⁷ Henning Genz, Die Entdeckung des Nichts, „Otto von Guericke und die ersten Luftpumpen“, Seite 157

die Kugel weiter leer zu pumpen, bis die Kugel schließlich implodiert und damit in sich zusammen sackt. Kurz danach lässt sich Guericke eine stärkere Metallkugel anfertigen die er nun luftleer pumpen lassen kann (Abb. 10).



Abb. 10 zeigt zwei Männer bei der Entleerung einer Metallkugel von Luft

Um seine Pumpen noch weiter zu perfektionieren, muss er sie besser abdichten. Um dies zu erreichen setzt er Teile der Pumpe unter Wasser, da Wasser bekanntlich schwerer durch Ritzen gelangt als Luft²⁸.

Die Magdeburger Halbkugeln

Das Titelbild auf der ersten Seite zeigt einen Kupferstich aus dem 17. Jahrhundert, der einen, wenn nicht den berühmtesten, Vakuum-Schauversuch zeigt. Otto von Guericke ließ eine aus zwei Kupferhalbkugeln bestehende Kugel, mit einem ungefähren Durchmesser von 50 cm, evakuieren und ließ anschließend auf jeder Seite der beiden Halbkugeln 8 Pferde aufstellen, die durch ihr Geschirr mit den Kugelhälften verbunden wurden. Alle 16 Pferde zusammen schafften es nicht die beiden Halbkugeln voneinander zu trennen. Dies gelang erst als ein kleines Mädchen an der Metallkugel ein Ventil öffnete, worauf die Kugel wie von Geisterhand in zwei Hälften auseinander fiel. Dies konnte Guericke nur gelingen weil er erkannt hatte, dass der Zusammenhalt der beiden Halbkugeln allein vom Luftdruck und nicht, wie schon vor ihm Pascal feststellte, vom Vakuum abhängt. Des Weiteren war Guericke

²⁸ Henning Genz, Die Entdeckung des Nichts, „Otto von Guericke und die ersten Luftpumpen“, Seite 159

bekannt, dass der Druck auf die Kugeln mit der Vergrößerung des Durchmessers derselbigen stieg und man so mehr Kraft aufwenden musste, um beide wieder auseinander zu bringen. Dies war wichtig um zu berechnen wie groß eine Kugel sein müsse, damit sie 6, 8 oder 10 Pferde sie nicht auseinander bringen konnten. Geschah dies doch, fielen beide Hälften mit einem Lauten Knall auseinander. Es ist nicht sicher ob Guericke wusste, dass er statt den 16 Pferden auch bloße 8 Pferde hätte nehmen können und die andere Seite der Kugel einfach an einer Wand befestigen hätte können. Wahrscheinlich war ihm aber dieser Sachverhalt klar und er wollte bloß durch die zusätzlichen Pferde den Schaugehalt seines Experimentes steigern. Dies gelang ihm auch. Sein Versuch wurde noch viele Male an verschiedenen Fürstenthöfen und Marktplätzen durchgeführt, wo er auch im Jahre 1654 in Regensburg in Gegenwart des Kaisers von den Experimenten Torricellis erfuhr und sie kurz darauf selber nachmachte²⁹.

Epilog zur Geschichte des Vakuums

Erst mit dem Fortschreiten der Industrialisierung, Elektrifizierung und im speziellen der sich erhöhende Bedarf an schnellen und guten Pumpen zur Herstellung von Glühlampen, kam die Pumpenentwicklung wieder in Fahrt. Im Jahr 1870 sorgte Bunsen für Erstaunen als er den körperlich anstrengenden Prozess des Pumpens durch seine Erfindung der Wasserstrahlpumpe erheblich vereinfachte. Diese beruht darauf, dass strömendes Wasser die Luft mit sich reißt und so einen an die Pumpe angeschlossenen Behälter evakuiert. Zu Beginn des 20. Jahrhunderts kamen die ersten Vorläufer heutiger motorgetriebener Pumpen auf, die durch die Entwicklung des Fernsehens und des frühen Radios weiter beschleunigt wurden, da für ihre Produktion z.B. der Herstellung Bildröhre ein Hochvakuum geschaffen werden musste.

Die heutigen, durch die Ansprüche der modernen Wissenschaft in ihrer Entwicklung vorangetriebenen, Pumpen können ein Ultrahochvakuum erzeugen, welches dem Druck auf der Mondoberfläche gleicht³⁰.

²⁹ der Vakuum-Mappe von Desy – „Geschichte des Vakuums“ – Seite 13

³⁰ der Vakuum-Mappe von Desy – „Geschichte des Vakuums“ – Seite 13

Die Nutzung des Vakuums

Das Vakuum wird heutzutage für vielfältige Zwecke eingesetzt. Es dient z.B. in der Lebensmittelindustrie dazu um bestimmte Lebensmittel vor Oxidation zu schützen. Dabei werden die Verpackungen z.B. von Kaffee oder von Erdnüssen luftleer gepumpt.

Auch im Haushalt kommt das Vakuum zum Einsatz: Der Staubsauger (auf Englisch: vacuum cleaner) funktioniert nur weil er in seinem Inneren einen Unterdruck aufbaut und so den Schmutz aufsaugen kann. Auch würde eine Thermoskanne ohne ihr Vakuum in ihren Wänden die Wärme oder Kälte nicht so lange halten können. Dies kann sie nur weil durch das Vakuum in den Wänden der Sauerstoff fehlt und somit der Wärmeaustausch erschwert wird.

Ebenfalls die Unterhaltungsindustrie hängt in großen Teilen vom Vakuum ab. So werden immer noch für die meisten Fernseher und Monitore Bildröhren benötigt. Bei ihrer Herstellung wird in den Bildröhren ein Hochvakuum erzeugt, damit sich später die Elektronen in ihm fast ungehindert fortbewegen können.

Auch in der Industrie werden Vakua eingesetzt. So zum Beispiel bei der Firma Freudenberg³¹: Hier wird das Vakuum benötigt um Dichtungsringe zu reinigen. Dabei wird eine Trommel mit O-Ringen in einen Plasmareaktor (Abb. 11 und 12) eingebracht und der Innenraum auf 0,2 mbar evakuiert. Nun gibt man ein Gemisch aus Argon, Argonsauerstoff und reinem Sauerstoff in den evakuierten Behälter.



Abb. 11 Plasmareaktor mit Trommelstab



Abb. 12 geschlossener Plasmareaktor

Anschließend wird ein elektrisches

³¹ Sitz der O-Ring KG in der Ortschaft Oberwihl im Südschwarzwald

Feld zwischen dem Kathodenstab und der Trommel, die als Anode dient, erzeugt. Dabei fusionieren die Kerne des zuvor hinzugegebenen Gasgemisches und bilden ein bis zu 3.800 Grad heißes Plasma. Dieses Plasma wird für kurze Zeit aufrechterhalten (Abb. 13). Die O-Ringe werden dabei dem Plasma nur ganz kurz ausgesetzt. Sie sollen schließlich nur gereinigt und nicht verdampft werden.



Abb. 13 Plasma entsteht im Reaktor

Das perfekte Vakuum, erreicht?

Seit dem 17. Jahrhundert versuchte man immer näher an das perfekte Vakuum heranzukommen. Doch wurde es nie geschafft einen Raum von aller Materie und den darin enthaltenen Gasen zu befreien³². Und wenn dies technisch möglich wäre, wäre dann dieser Raum wirklich leer? Mit Sicherheit nicht!

Entfernt man aus einem Raum so gut es geht alle Materie, durchströmt diesen Raum immer noch elektromagnetische Strahlung in Form von Licht oder Radiowellen. Dies kann man ganz einfach feststellen. Evakuiert man einen durchsichtigen Glasbehälter kann man immer noch durch ihn hindurch schauen. Auch Radiowellen können durch diesen leeren Raum geschickt werden. Und selbst magnetische Kräfte wirken in den leeren Raum und damit auch durch ihn hindurch. Dies erkannte schon Robert Boyle im 17. Jahrhundert³³.

Wenn man nun aber den evakuierten Raum mit dicken Wänden vor der elektromagnetischen Strahlung abschirmt, ist dann das Innere völlig leer?

Und wieder muss die Antwort lauten: Nein, auf Grund der Eigentemperatur der Wände die den „leeren Raum“ umgeben, senden sie selber elektromagnetische

³² Geo-Magazin, Nr.2/Februar 1999, „Der lange Kampf ums Nichts“, Seite 71

³³ Henning Genz, Die Entdeckung des Nichts, „Robert Boyle“, Seite 166

Strahlung aus³⁴. Diese elektromagnetische Strahlung ist nichts anderes als Wärmestrahlung. Sie ist viel schwächer als bei einer glühenden Herdplatte doch ist sie ohne weiteres mit den geeigneten Instrumenten messbar. Um diese Wärmestrahlung nun auch noch zu eliminieren müsste man die Temperatur der Wände auf den absoluten Nullpunkt, auf minus 273 Grad Celsius, hinunterkühlen können und somit den absolut leeren Raum erreichen können. Dies ist auch sicher richtig, jedenfalls dachte man so bis zum Anfang des 20. Jahrhunderts. Doch der Gedanke vom absolut leeren Raum wurde abermals, durch die Theorie der Quantenmechanik, über den Haufen geworfen! Doch was besagt die Quantenmechanik eigentlich? Um dies zu verstehen ist es wichtig einen wichtigen Grundsatz der Quantenmechanik zu kennen und auch zu verstehen: die Heisenbergsche Unschärferelation.

Die Heisenbergsche Unschärferelation

Aufgestellt wurde sie von dem deutschen Physiker Werner Heisenberg 1927 und beruht auf quantenmechanischen Kräften.

Grundsätzlich lässt sich sagen, dass umso kleiner ein Objekt ist, desto stärker wirken die quantenmechanischen Kräfte auf sie³⁵. Jetzt stellt sich natürlich die Frage nach dem Übergang zwischen kleinen und großen Objekten, wo liegt die Grenze zwischen ihnen? Dazu müssen wir unsere Anschauung der Welt in Makro- und Mikrowelt unterteilen. Zur Makrowelt gehören grundsätzlich gesagt alle Objekte die wir um uns herum wahrnehmen und die wir mit normalen Lichtmikroskopen, so wie wir sie aus der Biologie kennen, wahrnehmen können. Auf der anderen Seite gehören zur Mikrowelt erst einmal alle Objekte, die so klein sind, dass wir ihnen erst einmal nicht ohne weiteres gewahr werden. Zu ihnen zählen Moleküle, und die aus Molekülen bestehenden Atomen, mit den wiederum aus ihnen bestehenden Elementarteilchen. Im Gegensatz zu Demokrit, der als Atomist das Atom für elementar und damit unteilbar betrachtete, gehen wir heute davon aus, dass Teilchen wie Quarks (aus denen die Protonen und Neutronen, die Kerne des Atoms, aufgebaut sind) oder Leptonen (zu denen das Elektron gehört das um den Atomkern herumkreist) oder

³⁴ Geo-Magazin, Nr.2/Februar 1999, „Der lange Kampf ums Nichts“, Seite 71

³⁵ Henning Genz, Die Entdeckung des Nichts, „Unschärferelation“, Seite 242

auch Bosonen (Teilchen die Kräfte übertragen, wie z.B.: Das Photon oder das Graviton) zu den Elementarteilchen dazu gezählt werden³⁶. Diese Teilchen bilden die Grundlage unserer makroskopischen Welt, in der wir leben. Doch wie fast überall gibt es auch hier ein paar Ausnahmen, die zu beachten sind. Die Grenze, zwischen der Welt der Quantenmechanik und der klassischen Physik, die ihre Schlüsse hauptsächlich aus Experimenten und Beobachtungen in der makroskopischen Welt zieht³⁷, verläuft nicht immer scharf voneinander getrennt. So gleichen zwar z.B. Neutronensterne, Atome mit einem Durchmesser von 10 Kilometern, makroskopischen Objekten, verhalten sich aber im Gegensatz zu ihnen wie mikroskopische³⁸. Dass heißt, sie können nur durch Gesetze der Quantenmechanik verstanden werden, da ihr Verlauf in unserer Welt mit der Mechaniklehre Newtons³⁹ nicht bestimmt werden kann.

Und genau auf diese quantenmechanischen Objekte wirkt sich das Prinzip der Heisenbergschen Unschärferelation (im Nachhinein nur noch Unschärferelation genannt) aus.

Eines davon besagt, dass man einem quantenmechanischen Körper nie eine Gestalt, eine dazugehörige Lage und Geschwindigkeit, wie bei Objekten der klassischen Physik, zuordnen kann. Es ist einfach nicht möglich. Allein schon beim Versuch einen Blick in die mikroskopische Welt zu werfen, um eben die Lage und Geschwindigkeit eines Teilchen näher zu bestimmen, verändern wir bereits eben diese Lage und Geschwindigkeit, die wir ja messen wollen⁴⁰. Bei der näheren Bestimmung von quantenmechanischen Objekten durch Vergrößerung der Auflösung in Mikroskopen z.B. Elektronen-Raster-Mikroskopen verändern wir diese Objekte in dem wir sie mit Licht, also Photonen, und im Fall des Elektronen-Raster-Mikroskops mit Elektronen beschießen. Doch rechnet man diesen Effekt, den man durch den Versuch einer näheren Bestimmung von Position und Geschwindigkeit eines quantenmechanischen Teilchens verschuldet, heraus, bleibt eine gewisse Ungenauigkeit bestehen⁴¹.

Und genau diese Ungenauigkeit ist es, die aus der Unschärferelation hervorgeht.

Sie gilt zum einen für den **Ort und Impuls** eines quantenmechanischen Teilchens als auch für die **Energie und Zeit** desselbigen.

³⁶ <http://www.quantenwelt.de/elementar/>

³⁷ <http://www.quantenwelt.de/klassisch/>

³⁸ Henning Genz, Die Entdeckung des Nichts, „Unschärferelation“, Seite 242

³⁹ Henning Genz, Die Entdeckung des Nichts, „Newtons Raum und Zeit“, Seite 183

⁴⁰ Henning Genz, Die Entdeckung des Nichts, „Unschärferelation“, Seite 242

⁴¹ Henning Genz, Die Entdeckung des Nichts, „Unschärferelation“, Seite 242

Ort und Impuls

Der Dualismus von Ort und Impuls der Unschärferelation sagt, dass immer nur eine der beiden Größen genau bestimmt werden kann, wobei gleichzeitig die andere Größe total unbestimmt sein muss⁴². Unter Impuls versteht man die Geschwindigkeit in eine Richtung, in der Mathematik werden Impulse als Vektoren angegeben. Des Weiteren verlangt die Unschärferelation, dass keine der beiden Größen den Wert Null einnehmen können. Dies führt nun dazu, dass ein Teilchen **immer** eine gewisse Bewegungsenergie und eine dazu in Abhängigkeit stehende Lageenergie besitzt⁴³. Denn keine der beiden Größen kann laut der Unschärferelation den Wert Null haben. Die Summe aus Bewegungsenergie und Lageenergie wird als Gesamtenergie bezeichnet. Diese Gesamtenergie hat mindestens einen von Null verschiedenen Minimalwert, der nach dem Gesetz der Unschärferelation bei einem quantenmechanischen Teilchen **immer** vorhanden sein muss. Dieser Wert wird auch als Nullpunktsenergie bezeichnet.

Nullpunktsenergie

Umso kleiner der Raum ist, der einem Teilchen zur Verfügung steht, desto kleiner wird die Lageenergie des Teilchens, weil das Teilchen durch die Reduzierung des Raumabschnittes immer näher an die Lageenergie Null heran kommt. Im Gegenzug erhöht sich bei der Abnahme des zur Verfügung stehenden Raumes die Bewegungsenergie. Die kleinste Energie, die ein Teilchen noch haben kann, besteht demnach aus dem Kompromiss von Lage- und Bewegungsenergie, der so genannten Nullpunktsenergie⁴⁴.

Verdeutlicht wird diese Nullpunktsenergie dadurch, dass selbst beim absoluten Nullpunkt, also Null Kelvin oder minus 275 Grad Celsius, die Wände eines Hohlraums Wärmestrahlung abgeben. Als Hohlraum wird ein Raumabschnitt bezeichnet, der so gut es geht leer ist und außerdem durch seine Wände von elektromagnetischer Strahlung geschützt wird⁴⁵. Paradoxerweise geben die Wände

⁴² Geo-Magazin, Nr.2/Februar 1999, „Der lange Kampf ums Nichts“, Seite 72

⁴³ Henning Genz, Die Entdeckung des Nichts, „Nullpunktsenergie“, Seite 247

⁴⁴ Henning Genz, Die Entdeckung des Nichts, „Nullpunktsenergie“, Seite 247

⁴⁵ Henning Genz, Die Entdeckung des Nichts, „Hohlraumstrahlung“, Seite 226

des Hohlraumes selber auch beim absoluten Nullpunkt noch elektromagnetische Strahlung, die so genannte Wärme- oder auch Hohlraumstrahlung, ab. Aber wie kommt man darauf, dass beim absoluten Nullpunkt der Hohlraum noch Nullpunktsstrahlung (abgeleitet von der Hohlraumstrahlung beim absoluten Nullpunkt) enthalten soll? Denn schließlich ist es nicht möglich den absoluten Nullpunkt zu erreichen. Wir können weder ein Material noch einen Raum auf exakt minus 275 Grad Celsius herunterkühlen! Die Erkenntnisse über die Nullpunktsstrahlung gewinnt man deshalb durch das Verfahren der Extrapolation.

Extrapolation

Das Verfahren der Extrapolation kann nur dann angewendet werden, wenn wir z.B. bei der Untersuchung der Nullpunktsenergie, die zu untersuchende Größe, also die Energie, schon bei Werten über dem absoluten Nullpunkt erreichen. Gleichzeitig muss eine Abhängigkeit zwischen der Temperatur und dem daraus festgestellten Energiewert existieren. Besteht dieses Verhalten, sei es nun linear oder exponentiell, kann man daraus Rückschlüsse auf die Größe bei der absoluten Temperatur Null ziehen. Und diese ergibt, bei der Anwendung der Extrapolation, eine von Null verschiedene Größe.

Energie und Zeit

Neben dem Ort und der Geschwindigkeit eines Teilchens macht die Unschärferelation auch Aussagen über die Energie und Zeit. Dabei ist sie sogar unabhängig von dem, was sich in einem Raumgebiet befindet⁴⁶. Konkret bedeutet dies, dass die Unschärferelation der Energie und Zeit auch auf den leeren Raum angewendet werden kann. Das macht sie für das Thema Vakuum so interessant, da aus ihr folgt, dass unser physikalisches Vakuum angefüllt ist mit Energie. Ergo, es gibt keinen leeren Raum. Denn im leeren Raum entstehen und vergehen durch das Prinzip der Unschärferelation fortwährend Teilchen und ihre Antiteilchen. Dabei spielt der Faktor Zeit eine wichtige Rolle. Er hängt nämlich proportional zur Energie fest. Entsteht in einer so genannten Vakuumfluktuation ein schweres Teilchen, muss es sich für sein Entstehen kurzzeitig Energie leihen. Und umso mehr sich ein Teilchen Energie leiht, desto schneller muss es diese Energie wieder

⁴⁶ Henning Genz, Die Entdeckung des Nichts, „Nullpunktsenergie“, Seite 248

abgeben. Konkret bedeutet dies, leichte Teilchen mit wenig Energie können länger existieren als schwerere Teilchen, die wieder viel früher verschwinden. Ein wichtiger Grundsatz der für die Quantenmechanik wichtig ist der, dass es zu jedem Teilchen auch ein Antiteilchen geben muss. Das Antiteilchen besitzt genau wie das zu ihr gehörige Teilchen dieselbe Masse. Der einzige Unterschied besteht in der unterschiedlichen Ladung der beiden Teilchen. Das Antiteilchen besitzt nämlich genau die negative Energie, die das Teilchen als positive besitzt⁴⁷. Als Beispiel nehmen wir das Elektron. Sein Gegenüber ist das Positron, sein Antiteilchen. Beide entstehen zusammen bei einer Quantenfluktuation und vergehen auch wieder miteinander. Kommen die Beiden zusammen besitzen sie die Ladung Null⁴⁸ und zerstrahlen zu reiner Energie, in Form von Licht. Der Effekt ist so klein, dass wir ihn direkt nicht wahrnehmen können. Er hat größere Auswirkungen auf die quantenmechanische Welt, als auf die um uns herum. Die Quantenfluktuation ist also auch ein Maß dafür, wo wir uns gerade befinden. In der Mikro- oder Makrowelt. Das Vakuum in der Mikrowelt wird wesentlich stärker von den Vakuumfluktuationen beeinflusst, als das vergleichbare in unserer Makrowelt. Als eine Konsequenz aus den Vakuumfluktuationen bildet sich der Quantenschaum.

Quantenschaum

Durch die immer währenden Vakuumfluktuationen entstehen so genannte Vakuumblasen. Dieser Blasen entstehen auf Grund der Krümmung von Raum durch Energie oder Masse. Nach der Allgemeinen Relativitätstheorie von Albert Einstein ist Masse nichts weiter als eingefrorene Energie⁴⁹. „Eingefroren“ deshalb weil man sie nicht einfach in einen anderen Zustand von Energie umwandeln kann. Ein Beispiel: Wenn ein Auto bei voller Fahrt abgebremst wird, verwandelt sich seine Bewegungsenergie in Wärmeenergie, weil die Bremsscheiben des Autos bei der Abbremsung heiß werden und dadurch Wärmeenergie besitzen. Dies verlangt der Energieerhaltungssatz, der als unumstößliches Dogma für jeden Physiker gilt. Nun kann z.B. die eingefrorene Energie eines Elektrons nur dadurch frei werden, dass man es vernichtet. Dies geschieht, wie oben schon erwähnt, wenn man das Elektron mit seinem Antiteilchen, dem Positron zusammenbringt und beide in Energie

⁴⁷ Henning Genz, Die Entdeckung des Nichts, „E gleich m mal c-Quadrat“, Seite 238

⁴⁸ Henning Genz, Die Entdeckung des Nichts, „E gleich m mal c-Quadrat“, Seite 238

⁴⁹ Henning Genz, Die Entdeckung des Nichts, „E gleich m mal c-Quadrat“, Seite 237

aufgehen. Genau diese Energie eines virtuellen Teilchens, welches bei einer Vakuumfluktuation aus dem Nichts entsteht, ist für die Bildung der Blase verantwortlich. Denn nach der ART⁵⁰ krümmt die Energie den Raum. So schaffen die im Vakuum entstehenden virtuellen Teilchen ein Gebrodel aus Blasen, das Quantenschaum genannt wird. „Virtuell“ heißen die Teilchen, die dafür verantwortlich sind, nur, weil sie nach der Unschärferelation nur ganz kurze Zeit in Erscheinung treten und dann wieder verschwinden. Dabei werden sowohl Teilchen auch als ihre Antiteilchen als virtuelle Teilchen bezeichnet, weil sie ja beide aus dem Nichts entstehen und wieder in es vergehen. Um diese virtuellen Teilchen zu reellen Objekten zu machen, bedarf es nur einem, Energie. Das ist das Prinzip, nach denen die großen Teilchenbeschleuniger arbeiten. Sie führen dem Vakuum durch starke elektrische Felder so viel Energie zu, dass die virtuellen Teilchen in die Lage versetzt werden, sich zu materialisieren. Mit Hilfe riesiger Detektoren können diese dann sichtbar gemacht werden.

Fazit der Unschärferelation

Die Unschärferelation ist, wie oben erwähnt wurde, für einige Phänomene in der Quantenmechanik verantwortlich. Gleichzeitig lässt sich durch sie auch ein weiteres interessantes Experiment in unserer Welt, der Makrowelt erklären: der so genannte Casimir-Effekt. Aber dazu weiter unten mehr. Doch die Hauptaufgabe der Unschärferelation besteht darin, die Quantenmechanik zu erklären und sie zu beschützen. Wie sie das tut wird nach dem Kapitel „Quantenmechanik“ deutlich. Denn bisher wurde „nur“ das zentrale Prinzip der Quantenmechanik erklärt. Was die Quantenmechanik eigentlich ist wird im nächsten Kapitel erklärt.

Die Quantenmechanik

Wichtig um die Quantenmechanik zu verstehen ist es den Zusammenhang zwischen dem klassischen Teilchen- als auch dem Wellenbild zu verstehen. Bisher wurden in dieser Seminararbeit die quantenmechanischen Objekte als Teilchen bezeichnet. Dies ist aber nur bedingt richtig. Quantenmechanische Objekte können auch als Wellen verstanden werden. So können sich zum Beispiel zwei Wellen gegenseitig

⁵⁰ ART = Allgemeine Relativitätstheorie

vernichten, wenn die Wellenberge der einen Welle mit den Wellentälern der anderen Welle zusammenkommen⁵¹. Für Teilchen ist dies nicht möglich. Dies erklärt warum sich Teilchen und Antiteilchen, wenn sie aufeinander treffen auslöschen können. Jetzt aber daraus zu folgern, quantenmechanische Objekte wären Wellen wäre falsch.

Denn nach den Gesetzen der Quantenmechanik verhält sich dasselbe quantenmechanische Objekt einmal als Welle ein anderes Mal als Teilchen⁵². Wie zuvor weiter oben erwähnt, beschützt die Unschärferelation genau diese Gesetze der Quantenmechanik. Versucht man nämlich in einem Experiment die Teilcheneigenschaften z.B. eines Elektrons zu beweisen, zerstört man sogleich den zuvor erbrachten Beweis es handele sich beim Elektron um eine Welle⁵³. Und genau dieser Widerspruch zwischen Teilchen- und Welleneigenschaften ist es, der durch die Unschärferelation geschützt wird.

Wir können diesen Widerspruch nicht untersuchen und müssen daher akzeptieren, dass sich quantenmechanische Objekte einmal als Welle und einmal als Teilchen verhalten. So sehen es die Gesetze der Quantenmechanik vor.

Eine weitere Feststellung ist, dass weder das klassische Teilchen- noch das Wellenbild die Realität der quantenmechanischen Welt wieder gibt⁵⁴. Das soll heißen, dass wir aus der nüchternen Feststellung, ein Atom besteht aus Elektronen und einem Kern, nicht den Verlauf dieses Systems vorhersagen können. Als Erklärung dafür dient die Unschärferelation, die es uns nicht ermöglicht gleichzeitig auf den Ort und den Impuls eines Teilchens zu einer bestimmten Zeit zu schließen. Aus dieser Problematik ergibt sich die Indeterminiertheit der Quantenmechanik⁵⁵. Sie sagt eben genau dies. Man kann einen Ablauf in der quantenmechanischen Welt nicht vorhersagen. Auf jeden Fall nicht genau. Darum wurden Wahrscheinlichkeiten als die eigentlichen Beobachtungsgrößen der Quantenmechanik eingeführt⁵⁶. Sie erlauben es z.B. ein Teilchen in einem bestimmten Intervall oder mit einer ungefähren Geschwindigkeit anzugeben. Dies ist nur möglich, weil die Welleneigenschaften eines quantenmechanischen Teilchens auch gleichzeitig die Wahrscheinlichkeiten angeben. Dies führt zur Wahrscheinlichkeitsinterpretation der Quantenmechanik. Sie erklärt auch warum der Ort oder die Geschwindigkeit eines Teilchens unscharf ist. Wäre der Ort oder die Geschwindigkeit scharf, hätten wir den

⁵¹ Henning Genz, Die Entdeckung des Nichts, „Unschärferelation“, Seite 240 f.

⁵² Henning Genz, Die Entdeckung des Nichts, „Unschärferelation“, Seite 240

⁵³ Henning Genz, Die Entdeckung des Nichts, „Unschärferelation“, Seite 241

⁵⁴ Henning Genz, Die Entdeckung des Nichts, „Unschärfe und Anschauung“, Seite 244

⁵⁵ Henning Genz, Die Entdeckung des Nichts, „Unschärfe und Anschauung“, Seite 245

⁵⁶ Henning Genz, Die Entdeckung des Nichts, „Wahrscheinlichkeiten“, Seite 246

Zustand des Teilchens schon bei dem Versuch, den Ort oder die Geschwindigkeit festzustellen, verändert. Aber gerade der Zustand eines Teilchens gibt die Wahrscheinlichkeit an ihn in mehreren Orten zu finden. Dadurch, dass die Wahrscheinlichkeit besteht ihn in mehreren Orten zu finden, wirkt sein Ort unscharf⁵⁷.

Nach der Erklärung der Begriffe zur Quantenmechanik und der dazu gehörigen Unschärferelation, ist es sicher interessant zu wissen, dass unsere Naturgesetze, die für die makroskopische Welt gelten, wie z.B., dass der Apfel dadurch vom Baum fällt, dass er von der Schwerkraft dazu veranlasst wird, theoretisch auch auf Gesetze der Quantenmechanik zurückgeführt werden können⁵⁸. Aber warum hält sich der Mensch bloß an die einfacheren und anschaulicheren Gesetze der klassischen Physik? Ganz einfach, weil der Mensch auch einem wichtigen Prinzip der Natur folgt, und zwar dem nach dem einfachsten Prinzip oder Zustandes.

Der Casimir Effekt

Der Casimir-Effekt stammte ursprünglich, wie der Name schon vermuten lässt, von dem Holländer Hendrik Casimir⁵⁹. Er errechnete 1948, dass zwei Metallplatten im Vakuum sehr nah aneinander gebracht, ohne äußerliche Ursache, zusammengedrückt werden. Der Grund dafür ist die Hohlraumstrahlung. Der Casimir-Effekt beweist also die Existenz der Hohlraumstrahlung bei der Temperatur absolut Null. Dies geschieht abermals durch Extrapolation. Deshalb wird der Versuch nicht genau bei dem absoluten Nullpunkt sondern knapp darüber durchgeführt. Dabei werden zwei je einen Zentimeter große elektrisch leitfähige Platten in einer Entfernung von 0,005 Millimeter gegenübergestellt. Die elektrisch leitfähigen Platten fungieren hierbei als Leiter, was sie in diesem Experiment gleichzeitig zu spiegeln macht. Diese Leiter spiegeln elektromagnetische Strahlung und somit eben auch Hohlraumstrahlung. Und genau diese Leiter verursachen den Casimir-Effekt. Dadurch, dass sie so nahe beieinander stehen und nur gewisse Wellenlängen erlauben, nämlich kurze und

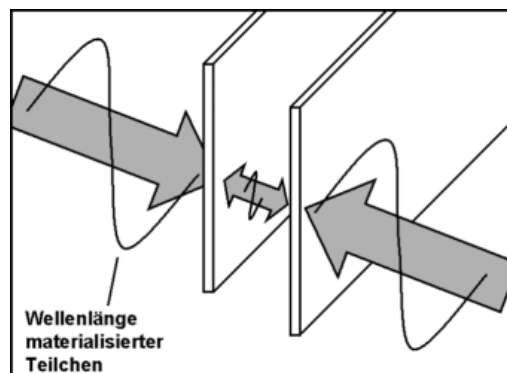


Abb. 14 zeigt den Casimir-Effekt

⁵⁷ Henning Genz, Die Entdeckung des Nichts, „Wahrscheinlichkeiten“, Seite 247

⁵⁸ Henning Genz, Die Entdeckung des Nichts, „Unschärferelation“, Seite 242

⁵⁹ Geo-Magazin, Nr.2/Februar 1999, „Der lange Kampf ums Nichts“, Seite 72

Wellen nur gestatten sich an ihren Flächen neu aufzubauen, können nicht alle Wellenlängen zwischen ihnen vorkommen. Kurz gesagt: Zwischen den Leiterplatten können nur Teilchen aus dem Quantenschaum entstehen, die von einer kurzen Welle beschrieben werden. Teilchen mit längeren Wellen können nur außerhalb der Platten existieren (Abb. 14). Folglich treffen außerhalb der Platten sowohl kurzwellige als auch langwellige Strahlungen auf die Platten. Viel mehr als also zwischen ihnen. Da quantenmechanische Objekte auch als Teilchen gesehen werden können, treffen die Photonen mit Lichtgeschwindigkeit auf die Platten auf und geben ihre Energie durch Rückstoß an die Platten ab. Die Platten erfahren also einen Druck von allen Seiten, jedoch ist der Druck zwischen den Platten niedriger, da weniger Photonen im Hohlraum zwischen den Platten sind als im freien Vakuum außerhalb der Platten. Durch den höheren Druck auf der Außenseite der Platten, werden also beide zusammengedrückt.

Dieses Experiment wurde von J.M. Sparnaay 1958 zum ersten Mal durchgeführt und ergab, dass die Platten mit einem Gewicht von 0,2 Milligramm, das entspricht dem Gewicht von 10 Staubkörnern, zusammengedrückt werden⁶⁰.

Dieser Versuch lässt den Schluss zu, dass man die Energie des Vakuums dadurch verringern könnte, indem man ihm etwas hinzuführt. Sieht man einmal von der Masse der Leiterplatten beim Casimir-Experiment ab, stimmt dies sicher, weil sich ja die Vakuumfluktuationen im Inneren des Hohlraumes, zwischen den Platten, verringert haben.

⁶⁰ Henning Genz, Die Entdeckung des Nichts, „Der Casimir-Effekt“, Seite 231

Forschung am Vakuum

Am Vakuum wird immer noch geforscht. Seit man entdeckt hat, dass aus ihm reale Teilchen entstehen können, werden Unsummen von Geldern dafür aufgewendet Teilchenbeschleuniger wie z.B. den LEP (den Elektron-Positron-Kollider) am Europäischen Laboratorium für Teilchenphysik in Genf oder den Ringbeschleuniger (Abb. 15) Hera am Deutschen Elektronen-Synchrotron zu bauen.

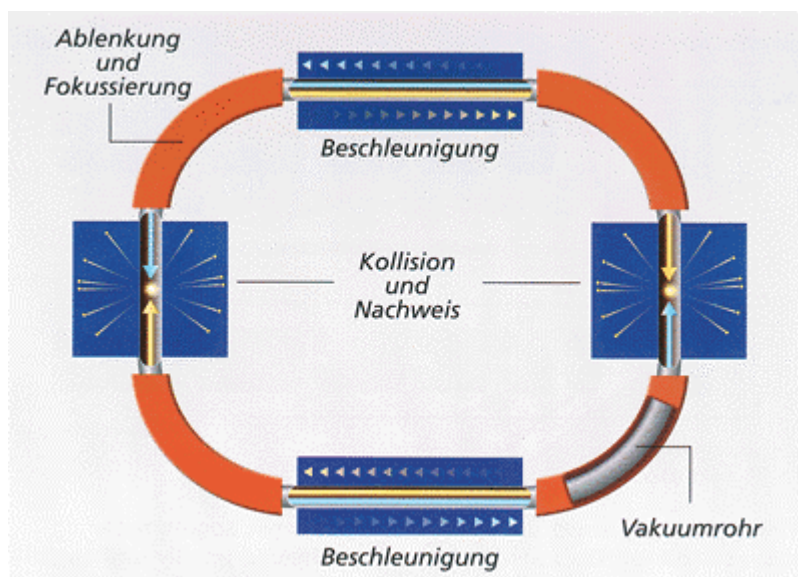


Abb. 15 Typisches Modell eines Ringbeschleunigers

Ein großer Teil des Geldes wird für den Bau großer Vakuumpumpen benötigt, die dafür Sorge tragen, dass sich auch nur die Teilchen im Beschleuniger befinden, mit den man forschen will. Das sind Gewöhnlicherweise Elektronen und Protonen. Diese werden durch starke Magnetfelder bis nahezu auf Lichtgeschwindigkeit beschleunigt bevor sie an dafür geeigneter Stelle mit dem für den Versuch vorgesehenen anderen Teilchen zusammenstoßen. So lassen sich beispielsweise durch die Zusammenschmelzung von Urankernen, Teilchen wie das Elektron und sein Positron aus dem Quantenschaum, durch die von der Verschmelzung freigesetzte Energie, herausbilden.

Ausblicke zum Vakuum

Zu dem Vakuum gibt eine abenteuerliche Vielfalt an Theorien. Manche dieser Theorien zielen, darauf ab den Ursprung und die Zukunft unseres Universums zu erklären oder zu bereits bestehenden Theorien Alternativen zu bieten.

Eine davon beschäftigt sich mit dem Gedanken unser Universum wäre aus einem Ur-Vakuum entstanden. Statt des Urknalls hätte es eine oder mehrere Vakuumblasen gegeben, die sich durch die in ihnen enthaltene Energie immer weiter aufgeblasen hätten. So lebten wir heute demnach in einer dieser Blasen⁶¹.

Die Energie des Vakuums wird in der so genannten Kosmologischen Konstante angegeben. Sie wurde erstmals 1917 als Rechenstück Albert Einsteins in die ART eingeführt, um die damalige Vorstellung eines statischen Universums aufrechtzuerhalten⁶². Aber mit der Zeit setzte sich die Vorstellung eines Inflationären Universums, das sich immer weiter ausbreite, durch und die Kosmologische Konstante verlor ihren Nutzen. Doch mit der zunehmenden Untersuchung des Vakuums gewann sie wieder an Wert. Und so betrachten Quantenphysiker sie heute als eine Größe, die die Energie der Felder und Myriaden von Teilchen im Vakuum angibt. Ihr bisher geschätzter Wert liegt aber viel zu hoch. Etwa 120 Zehnerpotenzen höher als der von Astronomen durch Beobachtung geschätzter Wert. Wäre nämlich die Energiedichte des Vakuums wirklich so groß, hätten wir ein völlig anderes Raum-Zeit-Gefüge, da es durch die hohe Energiedichte so gekrümmt wäre, dass wir keinen Kilometer weit sehen könnten. Und dies stimmt Gott sei Dank, wie wir wissen, nicht.

Man weiß heute, dass das Vakuum von zahlreichen Feldern durchzogen ist. Einige davon sind schon bekannt wie z.B. das Gravitationsfeld das für die Anziehungskräfte zwischen Massen verantwortlich ist. Derzeit suchen Wissenschaftler nach einem Feld, das man für die Masse der Materie verantwortlich macht. Doch bisher wurde dieses so genannte Higgs-Feld und die dazu gehörigen Higgs-Teilchen noch in keinem Teilchenbeschleuniger dieser Welt nachgewiesen.

⁶¹ Geo-Magazin, Nr.2/Februar 1999, „Der lange Kampf ums Nichts“, Seite 80

⁶² Geo-Magazin, Nr.2/Februar 1999, „Der lange Kampf ums Nichts“, Seite 80

Epilog

Wie in der Einleitung schon erwähnt wurde, ist das Nichts viel mehr als das. Es ist eigentlich Alles. Aus ihm können Teilchen aller Art entstehen. Man muss nur wissen, wie man das Vakuum dazu bewegt, seine Myriaden von Teilchen entstehen zu lassen. Wer bestimmt darüber? Welche Gesetze sind für den Gang der Dinge verantwortlich? Gibt es Erscheinungen in unserer Welt, die wir mit unseren klassischen Gesetzen nicht erklären, nicht fassen können? Gibt es da draußen im Weltall Phänomene, die sich unserer alltäglichen Vorstellungskraft entziehen? Wie wurde das Universum geschaffen? Was erfüllt das Universum? Ich hoffe, dass durch meine Erläuterungen während dieser Seminararbeit klar geworden ist, welche Antworten man auf die oben gestellten Fragen geben könnte. Denn wenn jemand solch eine Frage stellen sollte, wäre es sinnvoll eine Meinung dazu zu haben. Denn die moderne Physik ist nicht allen Menschen so ohne weiteres zugänglich. Sie ist im Gegensatz zu der klassischen Physik sehr abstrakt geworden. Es besteht also die Gefahr, dass sich manche Menschen, auf die fundamentalen Fragen unserer Zeit, falsche Antworten geben und sich so falsch informieren und dieses falsche Wissen an andere weitergeben, die es auch nicht besser wissen. Diese Arbeit soll dieser Tendenz, wenn auch nur im beschränkten Maße, entgegenwirken.

Quellenangaben

1. Klaus Bachmann, Vakuum – Der lange Kampf um Nichts, in: GEO – Das Neue Bild Der Erde Nr.2/ Februar 1999
2. Stephen Hawking, Eine Kurze Geschichte Der Zeit. Reinbeck 1991
3. Henning Genz, Die Entdeckung des Nichts – Leere und Fülle im Universum, Reinbeck 1999, 2. Auflage Januar 2002
4. <http://www.desy.de/html/home/index.html>
5. <http://home.t-online.de/home/dominik.schmitt/vorsokra.htm>
6. http://www.lsw.uni-heidelberg.de/~amueller/lexdt_q.html#qv
7. <http://www.quantenwelt.de/>
8. <http://www.lexi-tv.de/lexikon/thema.asp?InhaltID=957>

Bildnachweis

Titelblatt: Kupferstich aus dem 17. Jahrhundert von Vakuummappe – siehe Anhang

Abb. 1: Lexikon der Physik

Abb. 2: Internet

Abb. 3: Microsoft Encarta 2003

Abb. 4: <http://galileo.imss.firenze.it/museo/a/esperim.gif>

Abb. 5: Henning Genz, Die Entdeckung des Nichts, Reinbeck 1999

Abb. 6: Henning Genz, Die Entdeckung des Nichts, Reinbeck 1999

Abb. 7: Internet

Abb. 8: Henning Genz, Die Entdeckung des Nichts, Reinbeck 1999

Abb. 9: Henning Genz, Die Entdeckung des Nichts, Reinbeck 1999

Abb.10: Henning Genz, Die Entdeckung des Nichts, Reinbeck 1999

Abb.11: Andreas Masuch

Abb.12: Andreas Masuch

Abb.13: Andreas Masuch

Abb.14: <http://www.steffen-grimm.de/zufallundseele/casimir.gif>

Abb.15: Desy

Anhang

Erklärung :

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit in allen Teilen selbstständig angefertigt habe.

Die Stellen, die wörtlich oder dem Sinn nach der Literatur oder anderen Quellen entnommen sind, habe ich in der für wissenschaftliche Arbeiten üblichen Form als Entlehnung kenntlich gemacht.

Görwihl, den 05.06.03