

6. WOMIT DAS VAKUUM GEFÜLLT IST

In der Bibel steht im zweiten Buch der Makkabäer der erstaunliche Satz einer Mutter: »Ich bitte dich, mein Kind, schau dir den Himmel und die Erde an; sieh alles, was es da gibt, und erkenne: Gott hat das aus dem Nichts erschaffen, und so entstehen auch die Menschen.« Deutlich wird in dieser Aussage der griechische Einfluss auf den jüdischen Glauben im 2. Jahrhundert vor Christus, in dem auch die Geschichte der Makkabäer spielt. Aber gibt es das »Nichts« eigentlich? Oder anders gefragt: Was ist eigentlich dort, wo nichts ist, was ist in einem leeren Raum, im Vakuum?

Ausgehend von der griechischen Philosophie des Aristoteles gibt es den Begriff des *horror vacui*. Damit meinte man die Abneigung der Natur gegen alles Leere. Demnach musste alles von einem Medium erfüllt sein. Ein völlig leerer Raum, wie ihn Demokrit annahm, in dem sich seine unteilbaren Teile (Atome) bewegen konnten, wurde von Platon und Aristoteles abgelehnt. Vielmehr gingen sie von einem Äther aus, der das All erfüllte und in dem sich auch die himmlischen Objekte wie Sonne, Mond und Planeten auf vollkommenen Kreisbahnen bewegten. Mit dieser grundlegenden Annahme und Setzung in der Philosophie wurde über lange Zeit nicht weiter über das Vakuum nachgedacht. Zudem war es praktisch auch nicht relevant für die Menschen auf der Erde, da die Möglichkeiten zur Herstellung eines Vakuums nicht gegeben waren.

Erst Mitte des 16. Jahrhunderts gelang es zunächst Evangelista Torricelli mit einem Glasrohr, in dem sich Quecksilber

befand, ein Vakuum herzustellen. Dazu tauchte er das gefüllte Gefäß in eine Schale, in dem sich auch das bei Raumtemperatur flüssige Metall befand. Die sichtbare Säule des Quecksilbers fiel auf einen bestimmten Betrag nach unten. Oben im Glasrohr blieb ein leerer Raum. Im Grunde ist das ein Quecksilberbarometer, wie man es auch heute noch kaufen kann, bei dem die Höhe der Quecksilbersäule den aktuellen Luftdruck anzeigt. Blaise Pascal entwickelte dieses Instrument weiter zum Luftdruckmessgerät. Er experimentierte mit der Anordnung Torricellis, weil er der Meinung war, dass Luft ein bestimmtes Gewicht haben müsse. So ließ er den Versuchsaufbau von seinem Schwager auf einen Berg bringen und konnte dabei beobachten, dass die Höhe der Quecksilbersäule im Glasrohr offenbar mit dem Luftdruck schwankte. Je höher die Anordnung getragen wurde, desto niedriger sank die Säule im Glasrohr, und je näher sie wieder zurück an die Seehöhe gebracht wurde, desto höher stieg sie. Über der Quecksilbersäule blieb im Gefäß allerdings immer ein Vakuum zurück. Noch heute heißt die Einheit für den Luftdruck nach ihm »Pascal«, und damit man sich von der zuvor üblichen Tausendereinheit in Millibar nicht trennen musste, wurde die seltsame Einheit »Hekto-Pascal« eingeführt.

Aber zurück zum Vakuum und der Leere oder besser der Wirkung der Leere. Otto von Guericke machte Mitte des 17. Jahrhunderts verschiedene Experimente mit zwei aneinandergfügten Halbkugeln, aus deren Innerem mithilfe einer Pumpe die Luft gezogen wurde. Die Halbkugeln, die durch den Luftdruck aneinandergespreßt wurden, konnten je acht Pferdegespanne auf jeder Seite (also 32 Pferde) nicht mehr voneinander trennen. Die 32 Pferde waren eine

PR-Masche, denn es hätte auch ein Baum oder ein anderes befestigtes Widerlager gereicht, um mit einer Kraft von tatsächlich nur 16 Pferden an den Kugeln zu ziehen. Letzten Endes zeigte es aber, mit welchem Gewicht Luft auf das Vakuum in der Kugel drücken musste. Immerhin halten die Kugeln Guericques nach modernen Berechnungen 1,4 Tonnen an Gewicht aus!

Das Vakuum wurde überall dort interessant, wo man eine Verbrennung unterbinden wollte - zum Beispiel in einer Glühlampe, in der ein Glühfaden in einem von der Luft evakuierten Glaskolben befestigt ist. Hilfreich erwies es sich auch überall dort, wo man Flüssigkeiten abpumpen oder Gegenstände oder Substanzen von etwas auflesen musste - so zum Beispiel bei unserem heute noch immer gebräuchlichen Staubsauger, der schon Mitte des 19. Jahrhunderts erfunden wurde.

Richtig interessant wurde es mit dem Vakuum aber erst wieder, als man darüber nachdachte, ob nicht doch ein Äther, ein ganz besonders durchsichtiger, leichter Stoff existierte, in dem das Licht sich ausbreitete. Er sollte das ganze Weltall erfüllen und überall präsent sein. Ein solches Medium konnte allerdings nicht nachgewiesen werden. Daraus folgt, dass sich elektromagnetische Wellen, aus denen auch das sichtbare Licht besteht, in einem völlig leeren Raum ausbreiten können - und das, ohne weitere Hilfe zu benötigen.

Was war aber dann im Weltraum, in den ganz großen Räumen zwischen den Sternen und Galaxien? Oder was befand sich in den kleinsten Räumen zwischen den Atomen, die man Anfang des 20. Jahrhunderts zu vermessen begann? War dort »nichts«? Man fand heraus, dass sich überall irgendetwas befinden musste, wenn auch sehr wenig. In den interstellaren

Räumen geht man von einigen hundert Teilchen in einem Kubikzentimeter aus. Zwischen den großen Galaxienhaufen, den »großen Löchern« im Weltall, mögen es noch wesentlich weniger sein. Und damit sind wir wirklich beim »reinsten« Vakuum im ganzen Kosmos angelangt. Zum Vergleich: Selbst im reinsten Hochvakuum auf der Erde geht man noch von hunderttausenden von Teilchen in einem Kubikzentimeter aus. So »dicht« sind etwa auch die Gas- und Staubwolken in der Milchstraße, die Astronomen beobachten können.

Als aber die Physiker das Problem des reinen Vakuums mithilfe der Quantenphysik angingen, machten sie eine erstaunliche Entdeckung: Aufgrund der Heisenbergschen Unbestimmtheitsrelation können immer wieder Teilchen aus dem Nichts entstehen und vergehen. Es ist so etwas wie eine ausgeliehene Energie, die sich die Natur eine Zeitlang borgen kann, um sie dann wieder umgehend zurückgeben zu müssen. Für ein sehr kleines Teilchen, das Elektron zum Beispiel, ist diese Zeit extrem kurz: 10^{-20} Sekunden, das ist eine Eins mit 20 Nullen nach dem Komma, bevor eine weitere Zahl folgt. Selbst das Nichts ist mit einer Art Energie und damit gleich mit kleinen Teilchen gefüllt, die ständig im Werden und Vergehen sind. Das Vakuum ist also nicht nichts!

Man hat diesen vor sich hin brodelnden »Teilchensee« im Nichts nicht nur theoretisch berechnen können, sondern mittlerweile auch praktisch nachgewiesen. Es handelt sich dabei um den sogenannten Casimir-Effekt, eine Kraft, die auf zwei eng beieinanderliegende Metallplatten in einem Hoch-Vakuum wirkt. Diesen Effekt konnten Physiker experimentell tatsächlich messen, noch dazu in der vorhergesagten Größe, die vorher aus theoretischen Überlegungen berechnet wurde.

Auch hier im Bereich des größtmöglichen Vakuums, das wir Menschen auf der Erde erzeugen können, führt uns die Physik an den Rand dessen, was wir mit unserer Alltagserfahrung erfassen können. Sie zeigt uns durch die Geheimnisse der Natur einen Weg, der uns in noch tieferliegende Geheimnisse zurückführen kann, wie es Carl Friedrich von Weizsäcker einmal ausdrückte. Das Vakuum jedenfalls ist mit Energie gefüllt, und in jedem Augenblick werden und vergehen daraus Teilchen, die unsere Wirklichkeit beeinflussen können. Das Vakuum ist nicht leer, sondern ein kreativer Raum, der ständig Neues hervorbringt.

7. ALLES IST RELATIV! – RAUM UND ZEIT

Es gibt Dinge, auf die man sich verlassen können muss, beispielsweise, wenn man Hunger hat, wie weit es bis zum nächsten Bäcker ist. Oder: Welche Öffnungszeiten der Bäcker hat, damit man ein frisches Brot kaufen kann und nicht vor verschlossener Tür steht. Dazu bedienen wir uns in der Alltagswelt fester Bezugsgrößen. Entweder haben wir ein verlässliches Metermaß, das uns sagt, wie weit wir gehen beziehungsweise fahren müssen, oder wir nutzen ein Navigationsgerät, das uns anzeigt, wie groß die noch zu überwindende Distanz ist. Die Bäckerei nutzt die gleiche öffentlich zugängliche Uhrzeit, sodass der Kauf unserer Grundnahrungsmittel auch wirklich gesichert ist und reibungslos funktionieren kann.

Bis Albert Einstein mit seinen Erkenntnissen die Bühne der Geschichte betrat, waren auch Raum und Zeit feste, ewige und damit gleichbleibende Größen, auf die die Physik bauen konnte. Diese Meinung herrschte ebenso in der Physik, und es war kein anderer als Isaac Newton, der dieses Konzept seiner Theorie von der Schwerkraft zugrunde legte. Es gab nur wenige Hinweise darauf, dass mit dieser Setzung am Beginn seiner Theorie etwas nicht stimmen konnte. Eine davon war die Beobachtung der Merkurbahn: Die Drehung des Winkels seines Perihels hatte einen winzigen Betrag zu viel. Entweder musste noch ein bislang unbekannter Planet vorhanden sein – oder etwas stimmte mit der Gravitationstheorie nicht, die sich aber sonst im Sonnensystem glänzend bewährt hatte. Da der Planet innerhalb der Merkurbahn nicht gefunden

wurde, blieb den Physikern etwas Arbeit, um die wirkliche Natur von Raum und Zeit zu klären.

Albert Einstein ging Anfang des 20. Jahrhunderts von einer anderen grundlegenden Eigenschaft der Natur aus, als er die Zusammenhänge von Raum und Zeit besser klären wollte. Er wählte dabei als Ausgangspunkt die Geschwindigkeit des Lichtes im Vakuum: Sie sollte in Zukunft konstant und das Fundament sein, auf dem seine neue Theorie der Gravitation beruhte. Die Folgen waren im Alltag nicht spürbar, aber bei höheren Geschwindigkeiten oder in der Nähe massiver, schwerer Objekte ergaben sich daraus verstörende Resultate wie zum Beispiel: Die Zeit verstreicht nicht mit gleichlangen Sekunden, sondern jeder Beobachter hat seine eigene Zeit, mögen die Uhren auch noch so baugleich sein und funktionieren. Ähnlich verhält es sich mit der Länge eines Maßstabes, wenn er von unterschiedlichen Beobachtern betrachtet wird: Er hat nicht immer und überall die gleiche Länge, sondern es hängt davon ab, mit welcher Geschwindigkeit sich verschiedene Systeme bewegen.

Einstein beginnt mit der Feststellung, dass alle Beobachter immer die gleiche Lichtgeschwindigkeit messen. Sie hat das ungeheuer hohe Tempo von 299 792,5 Kilometer pro Sekunde im Vakuum. In Luft, Wasser oder auch anderen durchsichtigen Medien ergeben sich geringfügig andere Werte, wobei das Tempo immer etwas weniger hoch ist. Nichts im Kosmos kann sich also schneller bewegen als Licht im Vakuum. Diese Geschwindigkeit des Lichtes gilt auch dann, wenn sich Beobachter mit der halben Geschwindigkeit des Lichtes bewegen. Die Messung ist immer relativ zu ihrem Standort und ihrer Bewegung. Es ist die grundlegende Setzung der

Relativitätstheorie, die sich bislang in allen Versuchen der Physiker als richtig erwiesen hat. Was daraus folgt, ist in unserer Alltagswelt nicht immer nachvollziehbar, da wir uns deutlich langsamer bewegen als mit Lichtgeschwindigkeit.

Angenommen, zwei Raumfahrer bewegen sich jeweils mit etwas mehr als halber Lichtgeschwindigkeit durch den Weltraum. Wenn sie sich direkt aufeinander zu bewegen, könnte man meinen, sie würden mit mehr als der Lichtgeschwindigkeit aneinander vorbeifliegen. Das kann aber aus der grundlegenden Überlegung der Relativitätstheorie heraus nicht stimmen. Ein Nachrechnen der Gegebenheiten ergibt ein seltsames Phänomen: Wenn der eine Beobachter auf das Entfernungsmaß des anderen schaut, dann wird er es verkürzt wahrnehmen. Aber nicht nur das: Die Uhr des anderen Raumfahrers geht nach einer anderen, langsameren Zeit. Beide Auswirkungen führen nun dazu, dass sich die beiden Astronauten nicht mit Überlichtgeschwindigkeit treffen, sondern viel langsamer, deutlich unterhalb der Lichtgeschwindigkeit aneinander vorbeifliegen. Raum und Zeit werden dadurch gekrümmt und sind nicht zwei starre, immer gleiche Erscheinungen der Natur, sondern relativ zu ihren Beobachtern, ihrer Geschwindigkeit, den beteiligten Massen und auch den derzeitigen Beschleunigungen.

Das führt dazu, dass Zeit nicht mit gleichmäßiger Geschwindigkeit vergeht, sondern für jeden Beobachter in Bewegung in seinem eigenen Zeitmaß beobachtet wird. Auch der Raum ist bezogen auf den Zustand des Beobachters. Damit ist der Umfang eines Kreises nicht genau das Produkt aus der Zahl Pi und seinem Durchmesser, sondern leicht verschieden davon.

Man kann auch getrost annehmen, dass sich Körper aufgrund ihrer Masse anziehen, wie die Erde den Mond fest auf seiner Bahn hält und umgekehrt und der Mond mit seiner Anziehungskraft die Gezeiten erzeugt. Aber eine bessere Beschreibung der Wirklichkeit sieht nach der Relativitätstheorie so aus: Die vorhandene Materie, die Masse mit ihrem Gewicht ist es, die Raum und Zeit krümmt. Diese Krümmung bewegt sich in Raum und Zeit - wie sollte es anders sein - mit Lichtgeschwindigkeit fort. Die Sonne krümmt durch ihre große Masse den Raum in unserem Sonnensystem auf maßgebliche Weise und bestimmt durch diese Raumkrümmung die Bewegung der Erde in ihrem Umlauf um die Sonne. Worüber Johannes Kepler mit einer irgendwie gearteten magnetischen Kraft noch spekulieren musste, um die Ellipsengestalt der Planetensysteme zu erklären, zeigt Albert Einsteins Relativitätstheorie sehr elegant: Es ist die Krümmung des Raumes, die unsere Erde auf den Kurs einer sehr schwachen Ellipse um die Sonne bringt. Selbst das Licht folgt diesem Kurs, wenn es in die Nähe der Sonne kommt und auf seiner Reise durch den von ihr geformten Weltraum läuft.

Aber auch der unterschiedlichen Zeit ist man auf die Schliche gekommen. Zwei Journalisten kamen auf die Idee, zwei sehr genau gehende Atomuhren in Flugzeuge zu packen. Das eine flog Richtung Osten, das andere in Richtung Westen um die Erde. Die Uhren bewegten sich jeweils in entgegengesetzter Richtung, aber mit der Differenz der Erdrotation beaufschlagt. Das machte fast 2 000 Kilometer in der Stunde aus - nicht sehr viel, gemessen an der Lichtgeschwindigkeit, aber ausreichend für ein signifikantes Ergebnis. Als nach einer Erdumrundung die Atomuhren wieder an ihren Ausgangsort

zurückkehrten, war die Uhr, die sich in Richtung Osten und damit schneller bewegt hatte, tatsächlich um den von der Relativitätstheorie vorhergesagten Betrag langsamer gegangen als die andere, die in Richtung Westen flog und sich langsamer bewegt hatte. Mit der sich ergebenden Zeitdifferenz war Einsteins Theorie bestätigt worden.

Ähnlich gut lässt sich mittlerweile mit genauen Atomuhren auch die Höhe in einem Gravitationsfeld messen. Vereinfacht gesagt: An der Spitze des Eiffelturms vergeht die Zeit etwas schneller als am Boden. Je näher ein Punkt der Erdoberfläche ist, desto stärker ist er auch der Wirkung der Masse unseres Heimatplaneten ausgesetzt. Und je stärker ein Schwerefeld ist, desto langsamer vergeht die Zeit.

Unsere Welt ist gerade bei großen Entfernungen und bei großen Massen wie zum Beispiel Galaxien von den davon verursachten Raumkrümmungen dominiert. Aber auch die Zeit verändert sich aufgrund der Geschwindigkeit eines Reisenden. Dafür gibt es eine immer wieder erwähnte und wichtige technische Anwendung: kein Navigationsgerät, das sich auf die genaue Ortsbestimmung von Satelliten im Weltall stützt, darf die Berücksichtigung der veränderten Zeit bei differierenden Geschwindigkeiten vernachlässigen. Sonst befindet sich der Benutzer sehr schnell im benachbarten Wald und nicht auf der Bundesstraße. So bringt unser Alltag die Relativitätstheorie Einsteins mit ihrer gekrümmten Raum-Zeit wieder mit unserer ganz gewöhnlichen Vorstellung von Raum und Zeit als gleichmäßigen Vorgaben in Einklang – ohne dass wir davon etwas bemerken würden.

Noch viele andere bemerkenswerte Folgerungen entspringen der Relativitätstheorie: das Konzept der Schwarzen Lö-

cher, die die Raumzeit derart krümmen, dass noch nicht einmal das Licht ihnen entkommen kann. Aber auch die erst in den letzten Jahren gemessenen Gravitationswellen hat Einstein vorhergesagt. Es handelt sich dabei um kleinste Wellenbewegungen des Raumes, die die Physiker nur mit höchst empfindlichen Apparaturen messen können. Allerdings hatte er es für unmöglich gehalten, dass sie jemals gemessen werden könnten. Die Geschichte der zunächst theoretisch vorhergesagten Gravitationswellen durch Albert Einstein und ihre Bestätigung nach einhundert Jahren in der Praxis ist für sich genommen schon ein überaus erstaunliches Kapitel physikalischer Forschung – nicht mehr als richtig, dass Forschern dafür der Nobelpreis in Physik verliehen wurde.