

Über das Fließen von Zeit und Materie in der Physik

Abstract Everyday perception suggests that time is in flux, and this supposedly factual and fateful constant shapes our understanding of the world and its change, including the various transformations of matter. In physics, the assumption and experience of flowing time is contrasted with the realisation that matter does not flow according to certain laws in a space that is conceived as absolute, but that matter and its movement on the one hand and the geometry of space-time on the other are mutually dependent and determine each other. Space is no longer the stage for the movement of matter, but the movement of matter and the geometry of spacetime are interdependent. This paper outlines the different theoretical stages, models and concepts of physical thinking about the relationship between time, space and matter since Newton and Kepler, through Einstein to modern quantum mechanics. The latter introduced a paradigm shift in physics by conceptualizing light and matter as waves, thereby opening new avenues for exploring the presumed flow of time. The consequences for our understanding of time and matter are far-reaching. The flow of time: not an immutable law, but our own creation. Absolute space: not an immovable framework for all events, but a flowing entity, of the same nature as time, eternally dancing with the matter that permeates it.

Über das Fließen von Zeit und Materie in der Physik

Venedig! Was für eine Kulisse für ein gemeinsames Nachsinnen über das Fließen der Dinge. Aus Sicht der Physik kann man sich hier richtig austoben. Über die Strömungsverhältnisse in diesem dichten Netzwerk aus großen und kleinen Kanälen könnte man sprechen, über deren Konsequenzen für die Verlagerung der Bodensedimente; über Wellenphänomene könnte man sinnieren, zum Beispiel über die Tatsache, dass die beiden Schenkel einer Kielwelle stets einen Winkel von neununddreißig Grad einschließen, ganz unabhängig davon, ob es sich um die Kielwelle einer Ente, eines Schwans oder eines Vaporetto handelt und unabhängig davon, mit welcher Geschwindigkeit das betreffende Objekt unterwegs ist. Oder man könnte das Spiegelbild der Restaurantterrasse am Kanalufer gegenüber betrachten, wie die Lichter zerfließen, wenn jene Kielwelle darüberstreicht: eine Menge über die schöne Mathematik der Kaustiken könnte man da lernen! Aber die Eleganz, die der Physik all dieser Dinge innewohnt, ließe sich nur in der Sprache der Mathematik angemessen deutlich machen, und mit Formeln möchte ich hier lieber sparsam sein.

Es sind auch gar nicht diese gegenwärtigen, materiellen Phänomene, die mich hier besonders inspirieren, es ist vielmehr die große historische Zeitspanne, die uns aus den von Seeluft und Zeit gegerbten Fassaden anblickt. Errichtet wurden sie unter Verwendung physikalischer Begriffe und Gewissheiten, die im Laufe der Jahrhunderte, vor allem des letzten, beträchtlich in Fluss gekommen sind. Lassen Sie uns dieser allmählichen Verflüssigung der Begriffe ein wenig nachspüren: vom Strömen und vom Fließen wird dabei genug die Rede sein!

Der Entstehungsort Venedigs inmitten einer Lagune ist (auch) Ausdruck unsicherer Zeiten. Dass man sich die unendliche Mühe machte, die nur gelegentlich trocken fallenden Untiefen und die wenigen, oft überschwemmten Inselchen im Sediment des Brento mit Palisaden zu befestigen, den Raum dazwischen so weit mit Erdreich zu füllen, dass man schließlich Häuser darauf bauen konnte, hatte auch den Grund, dass das

umgebende Wasser Schutz bot vor den Begehrlichkeiten anderer, etwa zur Zeit der Völkerwanderung. Für die berittenen Horden des sogenannten *Hunnensturms* waren diese Siedlungen jedenfalls unerreichbar. Eine Stadt also, wenn man so will, als Kondensat äußerer Unsicherheit.

Im Kontrast dazu war für die Menschen damals dennoch eines ganz sicher: dass Gott die Welt erschaffen hatte, und dass sie so war wie er sie erschaffen hatte. Auch dass zuerst die Welt geschaffen und erst am Ende des Schöpfungsakts der Mensch in sie hineingesetzt worden war, stand außer Frage. Die Welt also: von Gott gesetzt. Der Raum: die ewige Bühne, auf der sich alles abspielt, sogar der Schöpfungsakt selbst. Der naturphilosophische der beiden Schöpfungsberichte, jener der Priesterschrift, stellt das Geschehen als räumliches Geschehen vor, denn er bedient sich bereits räumlicher Relationen wie ›über‹, ›unter‹, ›zwischen‹, ohne deren eigenen Ursprung je zu problematisieren. Auch die im Verlauf des Schöpfungsakts verrinnende Zeit setzt er absolut, misst er sie doch in Tagen, als einer zur Zeit der Schöpfung bereits als gegeben gedachten Zeiteinheit.

Als Claudio Monteverdi in Venedig anno 1613 seine Stelle als Kapellmeister des Markusdoms antrat, hatte sein Zeitgenosse Johannes Kepler in Prag gerade seine ersten Einsichten über die Gesetzmäßigkeiten der Planetenbahnen publiziert. Erstmals wurden die Planetenbewegungen als physikalische Gesetzmäßigkeiten gedeutet und zwar in dem von den meisten Zeitgenossen damals noch als offenkundiger Irrsinn abgetanen heliozentrischen Weltbild. In ihrer Gänze lauten die Keplerschen Gesetze wie folgt:

- 1 Planeten bewegen sich auf elliptischen Bahnen, in einem ihrer Brennpunkte steht die Sonne.
- 2 Ein von der Sonne zum Planeten gezogener Fahrstrahl überstreicht in gleichen Zeiten gleiche Flächen.
- 3 Die Quadrate der Umlaufzeiten zweier Planeten verhalten sich zueinander wie die Kuben der großen Halbachsen ihrer Bahnellipsen.

Auch hier sind Raum und Zeit an sich feste Grundbegriffe. Der Raum und seine Geometrie: gleichsam das Blatt Papier, auf dem das *gesetzmäßige Geschehen* gezeichnet wird. Die gleichmäßig verrinnende Zeit: gleichsam das ordnende Prinzip, das aus den nacheinander stattfindenden Blicken durch das Fernrohr die *Bewegung* werden läßt. So selbstverständlich ist die Absolutheit von Raum und Zeit, dass sie gar nicht erwähnt wird. Erst

rund ein Menschenalter später hat Isaac Newton sie erstmals in naturwissenschaftlichem Zusammenhang explizit formuliert, und zwar 1687 in seinen *Principia Mathematica*:

- 1 Die Zeit verfließt vermöge ihrer Natur gleichförmig und ohne Beziehung auf irgendeinen äußeren Gegenstand.
- 2 Der absolute Raum bleibt vermöge seiner Natur, ohne Beziehung auf einen äußeren Gegenstand, stets gleich und unbeweglich.

In diesem wichtigen Werk hat Newton aber nicht nur die Absolutheit des Raums und der gleichförmig fließenden Zeit formuliert, er hat dort auch große Teile der Infinitesimalrechnung entwickelt; und mit deren Hilfe konnte er die Keplerschen Gesetze auf eine ganz einfache mechanische Gesetzmäßigkeit zurückführen. Sie ist bekannt als *Newtonsche Bewegungsgleichung* und lautet: die auf ein Objekt wirkende Kraft ist stets gleich dem Produkt aus seiner Masse und seiner Beschleunigung.

In Abb. 1 ist dies anhand eines senkrecht in die Luft geschossenen Pfeils illustriert. Das Diagramm stellt die Bewegung des Pfeils in der von Raum (Achse nach oben: Höhe) und Zeit (Achse nach rechts) aufgespannten Ebene dar. Die schwarze Kurve beschreibt die Höhenposition des Geschosses als Funktion der Zeit. Streichen wir in Gedanken gleichmäßig von links nach rechts an der Zeitachse entlang, gleichsam das Fließen der Zeit abbildend, so sehen wir darüber die schwarze Kurve nach oben aufsteigen, auf ihrem Scheitel zur Ruhe kommen, umkehren und nach unten abfallen, bis sie schließlich die Zeitachse wieder berührt. In der Sprache der von Newton entwickelten Infinitesimalrechnung ist die jeweils momentane Geschwindigkeit des Pfeils die *erste Ableitung* der Position nach der Zeit, geometrisch ist das die Steigung der Kurve. Die Beschleunigung ist die erste Ableitung der Geschwindigkeit nach der Zeit, also die *zweite Ableitung* der Position nach der Zeit. Sie ist ein Maß für die Krümmung der Kurve.¹

Wenn wir für einen Moment die Luftreibung des Pfeils vernachlässigen und nur die Wirkung der Schwerkraft betrachten, so ist die auf den Pfeil wirkende Kraft gleich dem Produkt aus seiner Masse und der Erdbeschleunigung, die ja konstant ist. Sie ist nach unten gerichtet, weil die Schwer-

¹ Für die Krümmung gibt es mehrere Definitionen. Die Krümmung des Graphen als geometrisches Objekt wäre der Kehrwert seines geometrischen Krümmungsradius. Hier verwenden wir als Krümmungsmaß die zweite Ableitung der einen Koordinate nach der anderen.

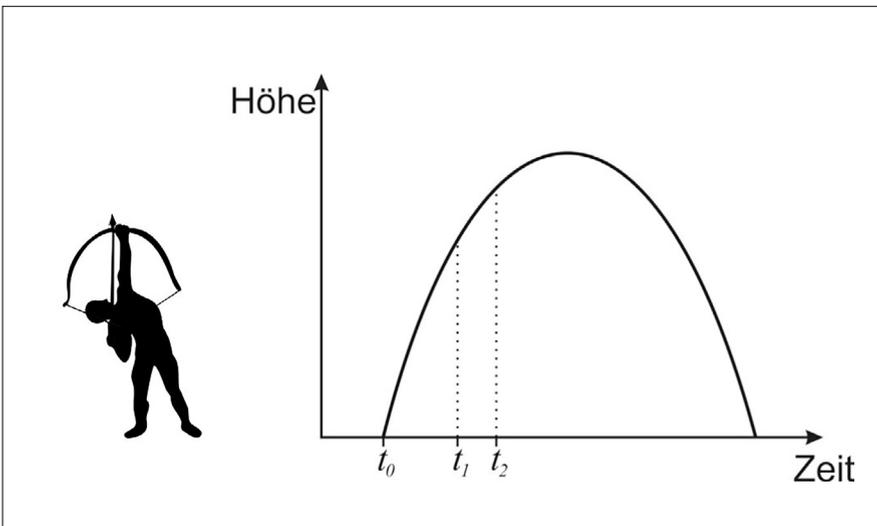


Abb. 1: Die Bewegung eines senkrecht nach oben geschossenen Pfeils. Dargestellt ist dessen Höhe als Funktion der Zeit.

kraft nach unten gerichtet ist. Die Newtonsche Bewegungsgleichung besagt nun, dass diese Kraft gleich sein muss dem Produkt aus der Masse des Pfeils und der Krümmung der Kurve. Also muss die Krümmung der Kurve gleich der Erdbeschleunigung sein, insbesondere also nach unten gerichtet und konstant. Eine Kurve mit konstanter zweiter Ableitung ist die Parabel, und deshalb hat die schwarze Kurve in Abb. 1 die Gestalt einer Parabel.

Die enorme Bedeutung der Newtonschen Bewegungsgleichung liegt aber in ihrer Allgemeingültigkeit: denn sie beschreibt nicht nur die Bewegung des nach oben geschossenen Pfeils, oder des Apfels, der der Legende zufolge dem unter einem Apfelbaum Mittagsschlaf haltenden Newton auf den Kopf gefallen sein soll, wodurch diesem angeblich der Geistesblitz kam, dass sich die Bewegungen der Himmelskörper auf dieselben physikalischen Gesetze zurückführen lassen könnten wie der Fall des Apfels. Der wirklich große Erfolg seiner Theorie bestand darin, dass sich aus ihr tatsächlich die Keplerschen Gesetze herleiten ließen! Und das mit einem so einfachen Gesetz: *Kraft ist gleich Masse mal Beschleunigung*, knapper und eleganter geht es kaum. Und damit ist offenbar nicht nur alles über Bewegungen massebehafteter Körper in Erdnähe, sondern auch alles über die Bewegungen der fernen Himmelskörper gesagt. Gemäß einer ebenfalls sehr alten, bereits von Aristoteles formulierten (aber meist Wilhelm von Ockham zugeschriebenen) Maxime ist eine Theorie stets daran zu messen, dass sie mit möglichst wenig Aufwand möglichst viele Phänomene zu deuten beziehungsweise vorherzusagen imstande ist. Und wäh-

rend Kepler noch drei lange Sätze brauchte, um allein die Planetenbahnen zu erklären, hatte Newton jetzt einen knappen Einzeiler formuliert, aus dem alles folgte, was man damals über mechanische Bewegungen zu wissen glaubte, egal ob im Weltall oder auf der Erde.

Die Grundüberzeugung, dass die innere Struktur der Naturgesetze einfach und elegant sein muss, können wir auch als auf dem oben genannten Gedanken der Geschöpflichkeit der Welt basierend denken. Wenn Gott die Welt erschaffen hat, so muss ihre innerste Struktur göttliche Ordnung und Schönheit widerspiegeln. Auch frühere Versuche, die Planetenbahnen auf einfache geometrische Strukturen und Objekte zurückzuführen, folgen letztlich dieser Idee. Dass die Grundidee der Eleganz der innersten Naturgesetze bis heute zwar enorm wirkmächtig ist, aber jeglicher erkenntnistheoretisch stichhaltigen Basis entbehrt, hat erst kürzlich Sabine Hossenfelder ausführlich dargestellt.² Wir werden in der Tat weiter unten sehen, dass diese Grundüberzeugung gerade in jüngerer Zeit stark ins Wanken geraten ist.

Es gibt bei dem Newtonschen Gesetz noch einen Stolperstein, der sich wiederum anhand von Abb. 1 gut veranschaulichen lässt. Angeblich beschreibt die gezeigte Kurve ja eine Bewegung, insofern sich aus dem Newtonschen Gesetz die Form der gezeigten Kurve ergibt. Aber wo ist die Bewegung? Um die zu sehen, mussten wir in Gedanken von links nach rechts gleichmäßig die Zeitachse entlangfahren. Aber dieser Vorgang kommt in Newtons Gesetz nicht vor. Letzteres stellt lediglich einen Zusammenhang her zwischen der Krümmung der Kurve und der (zu diesem Zeitpunkt wirkenden) Kraft. Überspitzt ausgedrückt scheint das physikalische Gesetz eine Welt zu beschreiben, in der es keine fließende Zeit gibt. Die unendlich vielen schwarzen Punkte, aus denen die Kurve besteht, repräsentieren unendlich viele Versionen der Welt, die sich durch die jeweils andere Position des Pfeils und den jeweils anderen Zeitpunkt unterscheiden. Sie existieren nebeneinander, für jeden Zeitpunkt eine Version, und natürlich schön zueinander passend aufgereiht, damit die zeitliche Reihenfolge stimmt. Die Welt zum Zeitpunkt t_0 kommt zuerst, danach irgendwann die von t_1 , kurz darauf die von t_2 , aber ohne das unerbittliche Fortschreiten von einer dieser Welt-Versionen zur jeweils nächsten, wie wir es in der Realität wahrnehmen. Wie auf einer Filmrolle, bei der ein Bild nach dem andern aufgereiht ist, und eins zum nächsten passt, die aber nicht im Projektor

² Sabine Hossenfelder, Das Hässliche Universum. Warum unsere Suche nach Schönheit die Physik in die Sackgasse führt, Frankfurt am Main 2018.

steckt und durchläuft, sondern vor uns auf dem Tisch liegt, sodass man sich jedes einzelne Bild in Ruhe anschauen kann.

Sie werden mit mir sicher darin übereinstimmen, dass eine solche Welt, in der die Zeit nicht fließt, ein recht exotisches Ding wäre. Mit unserer Wirklichkeit, der ganz dinglich-materiellen, in der wir uns vorfinden, hätte sie nur wenig gemein: wir kennen das Verrinnen der Zeit als eine Grundkonstante unseres Erlebens, die unsere menschliche Kultur bestimmt, und die uns in ihrer Übermächtigkeit durchaus auch Angst machen kann. So völlig exotisch und weltfremd diese ›Filmrollen-Welt ohne fließende Zeit‹ uns aber auch erscheinen mag: es ist genau die Welt, die von der Physik beschrieben wird. Tatsächlich gibt es nirgendwo in der Physik so etwas wie das Fließen der Zeit. Wenn es das dort gäbe, müsste es längst entdeckt worden sein. Interessanterweise tut dieser fundamentale Mangel der Tauglichkeit der physikalischen Beschreibung aber keinen Abbruch. Der in Abb. 1 dargestellte Vorgang ist ja hinreichend genau dadurch beschrieben, dass jedem Zeitpunkt die zugehörige Höhe zugewiesen wird, so wie es die Kurve tut. Die Physik kümmert sich nur darum, zu ergründen, welche Eigenschaften jeder Punkt auf der Kurve hat, und nach welchen Regeln jeder Punkt mit seinen Nachbarpunkten links und rechts zusammenhängt: das Ergebnis dieser Überlegungen ist die Parabel, die Abb. 1 zeigt.

Um wieder im Bild der Filmrolle zu sprechen: die Physik ergründet die Art und Weise, auf die zwei aufeinanderfolgende Bilder ähnlich sein müssen, und in welcher Weise sie sich unterscheiden dürfen. Für den Betrieb des Filmprojektors ist sie nicht zuständig. Welcher Zeitpunkt, also welcher Punkt auf der Zeitachse, zuerst zum ›Jetzt‹ wird und welcher dann als nächstes, und was dieses ›zum Jetzt werden‹ überhaupt bedeuten soll, wird von der Physik gar nicht in den Blick gefasst. Einsteins Meinung als Physiker dazu ist einem im März 1955 verfassten Kondolenzschreiben anlässlich des Todes seines Freundes Michele Besso zu entnehmen: »Für [...] Physiker hat die Scheidung zwischen Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft nur die Bedeutung einer wenn auch hartnäckigen Illusion.«³

Aber kann das Wort *Illusion* den Sachverhalt wirklich wiedergeben? Unter einer Illusion verstehen wir eine nachweislich unzutreffende Annahme. Dennoch ist es wahr, und für uns unzweifelhaft von großer Bedeutung, dass wir uns nicht frei in der Zeit bewegen können. Zweifellos ist

3 Zitiert nach: Markus Mühling, Einstein und die Religion. Das Wechselverhältnis zwischen religiös-weltanschaulichen Gehalten und naturwissenschaftlicher Theoriebildung Albert Einsteins in seiner Entwicklung, Göttingen 2011, S. 260 (Einstein, EA, 07–245.00).

das Verrinnen der Zeit in unser Leben und Erleben so innig eingewoben, daß man es nicht einfach als Illusion abtun kann. Immanuel Kant hatte dafür eine bessere Vokabel. In seiner *Kritik der reinen Vernunft* bezeichnete er solche Dinge als *Anschauungsformen*. Die Zeit ist für uns deshalb eine schlechthin fließende, weil dieses Fließen ein Teil der Art und Weise ist, wie wir die Welt wahrnehmen. Eine Form unserer Anschauung eben.

Wir können versuchen, dies im Stil der Physik als Gesetz zu fassen, indem wir sagen: *das Fließen der Zeit ist nicht Folge einer physikalischen Gesetzmäßigkeit, sondern Ausdruck und Folge der Tatsache, dass wir die Welt symbolisierend erfassen*. Das ist zwar eine deutlich stärkere Aussage als die von Immanuel Kant, aber ich will kurz zeigen, dass sie wahrscheinlich stimmt. Stellen wir uns einen Moment vor, in dem die Zeit stillstehen würde. Aus Sicht der Physik hätte dies inhaltlich nur Sinn in der Form des empirischen Befundes: Ich stelle fest, dass die Zeit gerade stillsteht. Wenn aber der oben schräggesetzte Satz stimmt, dann wird die Zeit gerade *durch diese Feststellung*, weil diese ja wiederum die Form einer symbolisierenden Erfassung der Welt hat, weiter vorangetrieben. In diesem Bild wäre ein Stillstehen der Zeit also ein logischer Widerspruch in sich. Anders ausgedrückt: wenn wir das Fließen der Zeit als Ausdruck und Folge der Tatsache ansehen, *dass* wir die Welt symbolisierend erfassen, so bekommen wir die Unerbittlichkeit des Verrinnens der Zeit, nämlich die Unmöglichkeit ihres Stillstehens, gratis in der Form einer logischen Notwendigkeit. Im Aristotelischen beziehungsweise Ockhamschen Sinne spricht dies sehr für diese Auffassung, ähnlich wie es für das einfache Newtonsche Bewegungsgesetz spricht, dass es nicht nur erfolgreich den Fall eines Apfels beschreibt, sondern die Keplerschen Gesetze gleich mitliefert. Insbesondere lernen wir aus dem oben Gesagten, mit Blick auf unser Thema, dass das Fließen der Zeit in der Physik nicht vorkommt; gar nicht vorkommen darf!

Kehren wir noch einmal zu Newtons Gesetz zurück. Seine besondere Bedeutung hatten wir in seiner Allgemeingültigkeit erkannt, die sich im Laufe der Zeit erwies und zu einer immensen Wirkungsgeschichte geführt hat. In den naturwissenschaftlich enorm fruchtbaren Jahrhunderten nach Newton entwickelte man daraus schrittweise auch eine Mechanik der Continua. Auch dies war erst durch die Infinitesimalrechnung möglich geworden, diesmal angewendet nicht in der Zeitrichtung, wie oben bei der Bewegung des Pfeils, sondern in den drei Raumrichtungen. Hier traten neben die Wirkung der Schwerkraft auf ein (infinitesimales) Massenelement auch die elastischen Kräfte und die viskosen Reibungskräfte, die die unmittelbar benachbarten Massenelemente auf es ausübten. Claude-Louis Navier

(1785–1836) und George Gabriel Stokes (1819–1903) entwickelten in diesem Formalismus die nach ihnen benannte *Navier-Stokes-Gleichung*, die ich den Lesern wegen ihrer (scheinbaren) Komplexität hier ersparen möchte.⁴ Wichtig ist allein, dass diese Gleichung auch nichts anderes besagt, als: Kraft ist gleich Masse mal Beschleunigung und dass sie behauptet, dass diese Aussage für jedes einzelne Massenelement an jedem Ort innerhalb des betrachteten Materials gültig ist.

Und in der Tat: die Navier-Stokes-Gleichung beschreibt, das zeigen alle experimentellen Beobachtungen, nicht nur die Strömungen in den Kanälen von Venedig, von Flüssen und Wirbelstürmen, ihr folgt auch das unendlich langsame tektonische Fließen der Gesteinsformationen, die Konvektion des Magmas im Erdinnern, oder die tödliche Dynamik pyroklastischer Wolken, sollte das Magma einmal bis an die Erdoberfläche gelangt sein. Alles Fließen in der Physik, namentlich auch in den Ingenieurwissenschaften, wird also durch dieses einfache Newtonsche Gesetz beschrieben: Kraft ist gleich Masse mal Beschleunigung.

Aber so schön, elegant und allgemeingültig die Newtonsche Bewegungsgleichung auch sein mag, sie ist leider falsch! Geahnt hat das zuerst Albert Einstein, im frühen 20. Jahrhundert, als er etwas ganz ähnliches tat wie Newton damals unter dem Apfelbaum. Newton hatte die Eingebung gehabt, dass die Bewegung des auf die Erde zu fallenden Apfels (ob dabei nun sein Kopf im Weg war oder nicht) vielleicht Ausdruck derselben Gesetzmäßigkeit ist wie die Bewegung der Planeten. Ganz ähnlich hatte Einstein die Eingebung, dass die Schwerkraft, also das Angezogen-Werden von der Masse der Erde, das ihn deutlich spürbar in den Stuhl drückte, auf dem er saß, vielleicht Ausdruck derselben Gesetzmäßigkeit ist wie die Beschleunigungskraft, die ihn im Fahrstuhl stärker auf den Boden drückte, wenn dieser zu steigen begann, oder die ihn im Eisenbahnzug in die Rückenlehne drückte, wenn der Zug anfuhr.

Wieder war hier die Suche nach Vereinheitlichung am Werk: ist die zahlenmäßige Gleichheit von träger Masse und schwerer Masse eines Körpers vielleicht Ausdruck davon, dass beide Massen ›identisch‹ sind, dass es sich ›begrifflich um ein und dasselbe‹ handelt? Anders ausgedrückt: ist ein beschleunigtes Bezugssystem (der Fahrstuhl oder der Zug) vielleicht ›ein und

4 Der Vollständigkeit halber sei angemerkt, dass elastische Terme zunächst noch nicht enthalten waren. Erst die Verallgemeinerung auf viskoelastische Materialien, die Navier und Stokes nicht mehr entwickelten, inkludiert auch diese Effekte.

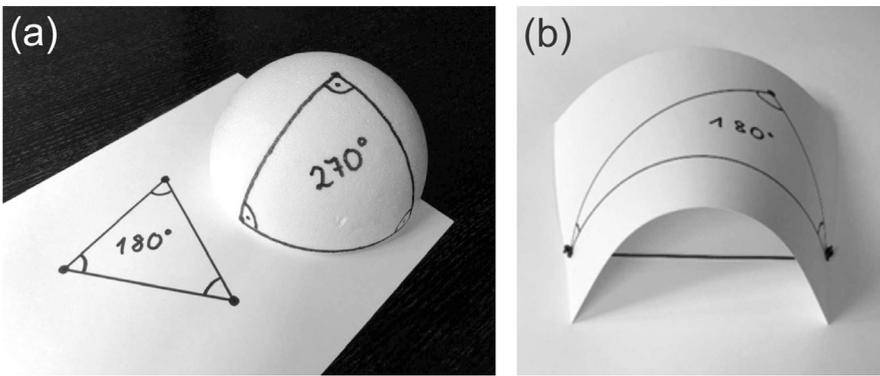


Abb. 2: Die Geometrie flacher und gekrümmter Räume erweist sich anhand der Winkelsumme der in ihnen gezeichneten Dreiecke. Beträgt diese Summe 180° handelt es sich um einen flachen (Euklidischen) Raum, Abweichungen von diesem Wert deuten auf eine Krümmung hin. (a) Winkelsummen im Dreieck auf flacher (180°) und kugelförmiger (270°) Fläche. (b) Ein gebogener flacher Raum ist noch immer flach!

dasselbe wie ein im Schwerfeld einer großen Masse befindliches Bezugssystem (das Büro, in dem man auf dem Stuhl sitzt)?

Einsteins Lösungsansatz hierzu lässt sich wiederum am besten anhand von Abb. 1 illustrieren. Da wir ja schon gesehen haben, dass die Zeit in der Physik nicht als fließend betrachtet werden muss, können wir die beiden Achsen »Höhe« und »Zeit« getrost als gleichberechtigte Achsen an einer zweidimensionalen Figur ansehen. Einstein hat damit auch nomenklatorisch Ernst gemacht, indem er nicht vom Raum (hier eindimensional, die Höhe des Pfeils) einerseits und von der Zeit andererseits (ebenfalls eindimensional) sprach, sondern von der Raumzeit (hier zweidimensional). Der die Bewegung beschreibende Graph ist eine Kurve in der Raumzeit, in der Ebene des Blattes, auf dem sie gezeichnet ist. Einstein fragte nun: könnte es nicht sein, dass die Krümmung der Kurve gar nicht als Folge einer Kraft gesehen werden muss, sondern in Wahrheit eine Folge der Krümmung der Raumzeit, also rein geometrischer Natur ist?

Um diesem kühnen Gedanken einen Moment nachzusinnen, müssen wir zunächst über den Begriff gekrümmter Räume sprechen. Der Einfachheit halber bleiben wir dabei in zwei Dimensionen: die Papierblätter, auf denen wir zeichnen können, sind zweidimensionale Räume und eignen sich zur Veranschaulichung. Abb. 2a zeigt (u. a.) ein ebenes Blatt, auf dem ein Dreieck gezeichnet ist, d. h. drei Punkte, die durch die drei jeweils kürzesten Wege miteinander verbunden sind. Seit Euklid von Alexandria wissen wir, dass die Winkelsumme im Dreieck stets 180° beträgt. Räume, in denen dies gilt, heißen daher *Euklidische Räume*.

Desgleichen abgebildet ist eine Halbkugel, auf der ebenfalls ein Dreieck gezeichnet ist. Auch hier sind drei Punkte miteinander verbunden, einer am Scheitelpunkt und zwei am Äquator. Und wiederum sind sie mit

den jeweils kürzest möglichen Wegen verbunden. In der Ebene sind das Geradenstücke, auf der Kugel sind es Großkreissegmente. Was man sofort sieht, ist aber folgendes: an jedem der Punkte steht ein Winkel von 90° , sodass die Winkelsumme in diesem Dreieck nicht 180° , sondern 270° beträgt. Dies ist Ausdruck davon, dass die Kugeloberfläche kein flacher, Euklidischer Raum ist, sondern ein gekrümmter. Die Krümmung eines (zweidimensionalen) Raums ist die Differenz der Dreieckswinkelsumme zu 180° , geteilt durch die Fläche des Dreiecks.⁵

Es ist sehr wichtig festzuhalten, dass ein gebogenes Blatt noch immer einen flachen Raum darstellt. Das ist in Abb. 2b gezeigt. Auch wenn das Blatt nun stark gekrümmt erscheint, beträgt doch die Winkelsumme in dem darauf gezeichneten Dreieck unverändert 180° . Und noch immer sind die Seiten des Dreiecks die kürzest möglichen Verbindungen zwischen den drei Eckpunkten, die in dem Raum bleiben, d. h. die auf dem Blatt bleiben. Der schwarze Faden, der zwischen zwei der Eckpunkte gespannt ist und der das Blatt gekrümmt hält, stellt zwar eine Verbindung zwischen diesen Punkten her, die offenbar kürzer ist als die entsprechende Dreiecksseite; aber er tritt aus dem Raum heraus, und das ist der wesentliche Unterschied. Halten wir fest, dass ein Blatt Papier auch dann ein flacher Raum bleibt, wenn man es biegt.⁶

Um dies nun mit der Physik zusammenzubringen, kehren wir wiederum zu Abb. 1 zurück. Die schwarze Kurve besteht aus den Punkten in der Raum-Zeit-Ebene, an denen das Geschoss während seiner Flugbewegung nacheinander zu finden ist. Man nennt es in dieser Sichtweise die *Weltlinie* des Geschosses. Diese Weltlinie ist zur Erde hin gekrümmt, und wir wollen uns nun an einer rein geometrischen Deutung dieser Krümmung versuchen, die ganz ohne einen Kraftbegriff auskommt. Dazu betrachten wir Abb. 3a, die sich von Abb. 1 nur dadurch unterscheidet, dass wir nun auch die Weltlinie der Erde eingezeichnet haben. Sie liegt so, dass der geometrische Ort der Erdoberfläche zu jedem Zeitpunkt bei Höhe = 0 liegt, also auf der Zeitachse. Sie ist anstelle einer Linie durch eine schraffierte Fläche dargestellt, denn die Erde hat ja eine beträchtliche Dicke und erstreckt sich weit nach unten, bis zu großen, negativen Höhenwerten. Es handelt sich also eher um eine *Weltwurst* denn um eine Weltlinie! Und nun illustrieren wir Einsteins Kerngedanken: könnte die Anwesenheit von Masse

- 5 Man verifiziert daraus leicht, dass die Krümmung einer Kugeloberfläche einfach durch den Kehrwert des Quadrats ihres Kugelradius gegeben ist.
- 6 Wenn man es natürlich nass macht und das Material deformiert, gilt dies nicht mehr. Aber das betrachten wir hier nicht.

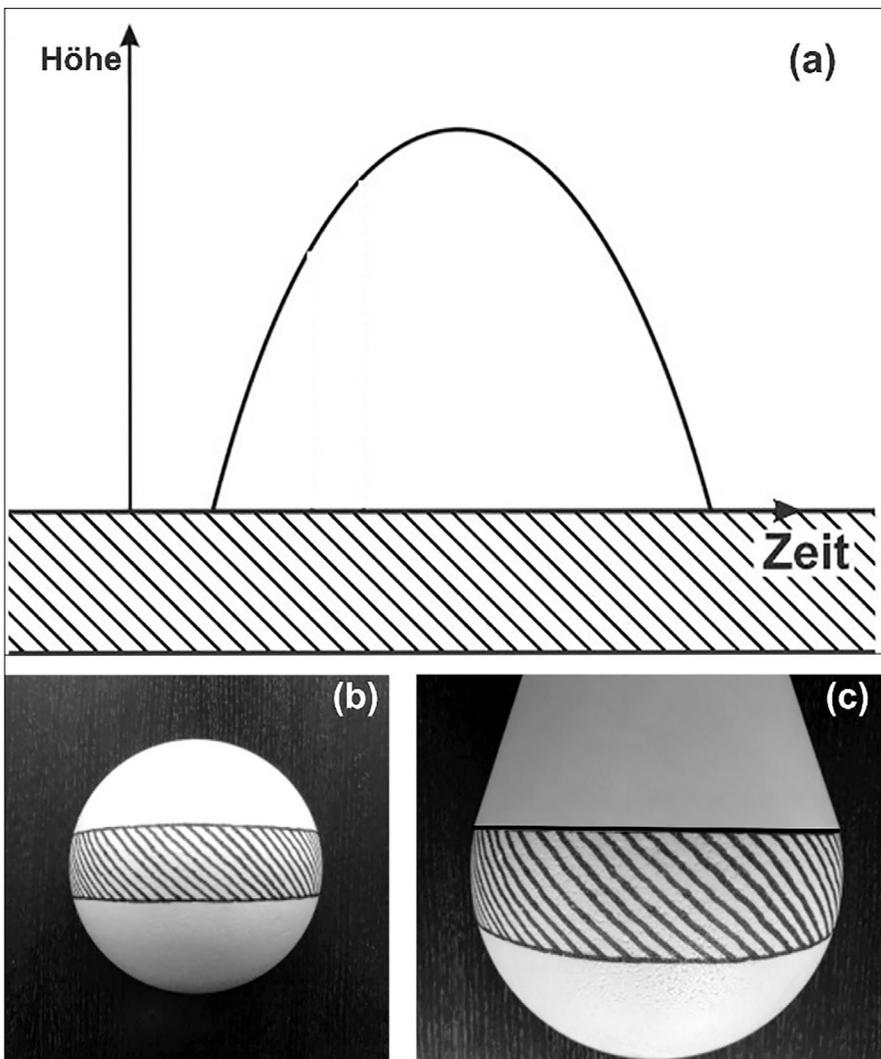


Abb. 3: (a) Weltlinie des Pfeils aus Abb. 1 und Weltwurst der Erde (schraffiert). (b) Die Weltwurst auf gekrümmter Fläche. (c) Stetige Anpassung der Weltwurst aus (b) an (flache) Kegelfläche (oben).

den Raum krümmen? Er hat es anders ausgedrückt, da er bereits früher erkannt hatte, dass Masse nichts anderes ist als eine Form von Energie.⁷ Sein Ansatz lautete daher: *die Krümmung des Raums ist proportional zur Energiedichte*. Dies ist, in knapper Form, die Grundaussage der *Allgemeinen Relativitätstheorie*.

Schauen wir nun, was das für Konsequenzen hätte. In Abb. 3a ist die schraffierte Fläche, die von der Erde belegt ist, als gekrümmter zweidi-

⁷ Mithilfe der bekannten Einsteinschen Formel $E=mc^2$ lässt sich Energie in Masse umrechnen und umgekehrt.

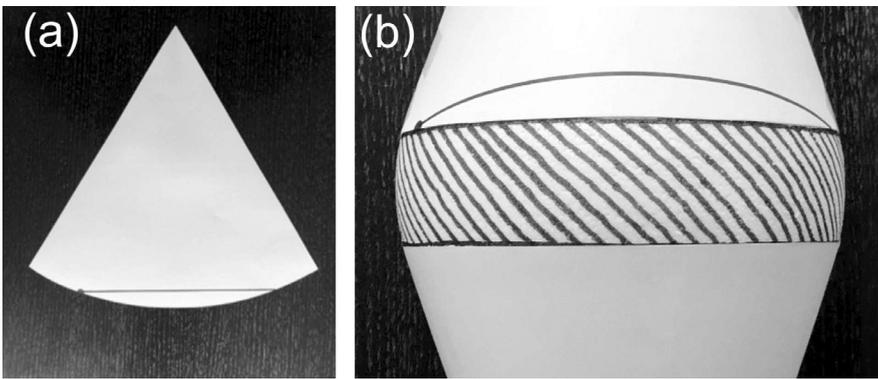


Abb. 4.

mensionaler Raum vorzustellen. Wir haben oben (Abb. 2a) gesehen, dass dies einer Kugeloberfläche entspricht. Abb. 3b zeigt, wie wir diesen Raumbereich demnach darstellen können: als schraffierten Streifen auf einer Kugel.

Der an die Erdoberfläche angrenzende Raum enthält hier nur die winzige Masse des Pfeils, die im Vergleich zur Erde vernachlässigbar klein ist. Diesen Teil des Raums müssen wir uns also flach vorstellen. Abb. 3c zeigt, wie wir an die Weltwurst aus Abb. 3b einen flachen Raum (hier: ein gebogenes Blatt Papier, Abb. 2b) stetig ansetzen können: indem wir einen geeignet bemessenen Kegel aufsetzen. Der Kegel lässt sich aus Papier biegen, ist also ein flacher zweidimensionaler Raum, und er grenzt überall entlang der schraffierten Fläche genau und tangential an diese an.

Nun müssen wir das Bild nur noch vervollständigen, indem wir die Weltlinie des Pfeils auf der Kegelfläche eintragen. Das geht am besten, wenn wir den Kegel noch einmal ausrollen und das Blatt, aus dem er besteht, flach hinlegen (Abb. 4a). Und da unsere Hypothese lautet, dass die Flugbahn des Pfeils rein geometrisch zustande kommt und nicht durch die Wirkung einer Kraft, zeichnen wir seine Weltlinie als eine Gerade, die, ebenso wie die Bahn des Geschosses, die Erdoberfläche (hier: den Rand des Kegelblatts) an zwei Punkten trifft. Dies ist die in der Figur gezeigte Sekante. Biegen wir das Blatt nun wieder zum Kegel und setzen diesen auf die Kugel, so ergibt sich das in Abb. 4b gezeigte Bild. Deutlich sieht man nun, wie die Weltlinie des Pfeils als gekrümmt erscheint, wie sie ganz von alleine wieder zurück auf die Erde findet!

Soweit ist das nicht mehr als eine sehr elegante Idee. Immerhin ist das Gesetz, das sie zum Ausdruck bringt, ebenso knapp und elegant wie die Newtonsche Bewegungsgleichung. Was ihr schließlich zum Durchbruch verhalf, war die Tatsache, dass sie Dinge erklären konnte, die für die Newtonsche Mechanik ein Rätsel blieben. Als Beispiel sei hier nur die Peri-



Abb. 5: Der Adler-Nebel, fotografiert mithilfe des Hubble Space Telescope. Die Struktur trägt auch den Namen »Die drei Säulen der Schöpfung«, da sich in diesen v. a. aus Silikat und Kohlenstoff bestehenden Dunkelwolken sehr viele Sterne neu bilden (NASA, USA 1995).

heldrehung des Merkur genannt. Es war schon lange bekannt, dass sich die Bahnellipse des Merkur allmählich dreht, der Merkur also streng genommen nicht auf einer Ellipse die Sonne umrundet, sondern auf einer Rosette. Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie, deren Grundgedanken wir oben skizziert haben, war die erste Theorie, welche die Bahnbewegung des Merkur schlüssig erklären konnte. Das gelingt mit den Keplerschen Gesetzen beziehungsweise der Newtonschen Bewegungsgleichung nicht. In der Folgezeit fanden sich noch unzählige Effekte, die durch den Einsteinschen Ansatz genauer beschrieben wurden als durch den Newtons. Wir müssen also davon ausgehen, dass das Einsteinsche Bild das richtige ist: Massen fallen frei im Raum, der seinerseits durch die Gegenwart der Massen gekrümmt wird, wodurch wiederum die Flugbahnen der Massen gebogen erscheinen.

Tun wir es Kepler und seinen Zeitgenossen gleich und greifen zum Fernrohr, um das Ergebnis auf uns wirken zu lassen. Heute verfügen wir über viel bessere Teleskope als damals und können Bilder phantastischer Schärfe von den Strukturen erstellen, die die Materie im Weltall formt. Abb. 5 zeigt einen vom Weltraumteleskop Hubble aufgenommenen Bildausschnitt vom sogenannten *Adler-Nebel*, einer kosmischen Staubwolke

zwischen den Sternbildern Schlangenträger, Schütze und Antinoos.⁸ Vergewärtigen wir uns nun, nach dem oben Gesagten, dass wir hier nicht Materie ›im Raum fließen‹ sehen, auch wenn es so scheinen mag; was wir hier sehen, ist der ›Tanz der Raumzeit mit der Materie!‹ Und in diesem Tanz führt nicht ein Partner den anderen, es ist vielmehr ein Spiel auf Augenhöhe.

Wohin sind wir nun gekommen bezüglich dessen, was unser Thema betrifft? Erst haben wir gesehen, dass es etwas so Selbstverständliches wie das Fließen der Zeit in der Physik nicht gibt, dann mussten wir einsehen, dass nicht die Materie nach bestimmten Gesetzen in einem als absolut gedachten Raum fließt, sondern dass die Materie und ihre Bewegung einerseits und die Geometrie der Raumzeit andererseits sich gegenseitig bedingen und bestimmen. Nicht ist der Raum mehr die Bühne für die Bewegung der Materie, wie das für frühere Generationen evident schien, sondern die Bewegung der Materie und die Geometrie der Raumzeit sind interdependent.

Wie bereits erwähnt, erarbeitete Einstein noch eine Menge weiterer Konsequenzen seiner Allgemeinen Relativitätstheorie, wovon einige hier für uns von Interesse sind. Stellen Sie sich zum Beispiel vor, wir hätten für unsere Bastelarbeiten in Abb. 2 bis 4 nicht Papier, sondern eine dünne Folie aus steifem Gummi verwendet. Äußerlich würde sich dadurch zunächst nichts ändern, aber wenn wir z. B. den Kegel in der fertigen Figur, wie in Abb. 4b, etwas anstoßen, so würden elastische Wellen darüber laufen, und auch die Weltlinie würde im Takt dieser Wellen vibrieren.

Tatsächlich fand Einstein, dass der Raum in der von ihm konzipierten Form ganz ähnliche Eigenschaften haben sollte wie unsere Gummimembran: er sagte die Existenz von Gravitationswellen voraus. Gravitationswellen sind so etwas wie Raumbeben; es wellt sich da nicht etwas, was im Raum existiert, sondern es ist der Raum selbst, der Wellen schlägt; etwa so wie die Erdkruste, auf der wir stehen, sich wellt und wackelt, wenn z. B. irgendwo zwei Kontinentalplatten gegeneinander verrutschen. Dafür sind natürlich enorme Energien notwendig, die zunächst in sich allmählich aufbauenden Verzerrungen des Basisgesteins gespeichert sind, und die dann plötzlich frei werden, wenn zwei unter Spannung stehende Kontinentalplatten gegeneinander verrutschen: für ein Beben der Stärke 6 auf der Richterskala entspricht diese Energie etwa dem gesamten Jahresprimärenergieverbrauch Deutschlands. Das ist noch recht unanschaulich,

aber mit Einsteins bereits genannter Umrechnungsformel können wir sie in eine Masse umrechnen, indem wir durch das Quadrat der Lichtgeschwindigkeit dividieren: es ist etwa die Masse von zwei Hühnereiern. Im Klartext bedeutet dies, dass die Erde bei so einem Beben insgesamt um etwa zwei Hühnereier leichter wird.

Und von dem Punkt aus, an dem die Kontinentalplatten gegeneinander verrutscht sind, breiten sich dann Wellen auf der Erdkruste aus. Das nennen wir also ein Erdbeben – und es ist schon ziemlich unheimlich, wenn etwas so solide Geglaubtes wie die Erde, auf der wir stehen, auf der wir unsere Häuser bauen, plötzlich unter unseren Füßen zu wackeln anfängt. Aber um wieviel unheimlicher ist dann die Vorstellung, dass ›der Raum selbst‹ plötzlich wackelt und bebt? Einstein hatte allerdings auch gesagt, dass der Effekt solcher Wellen so schwach sei, dass man sie wohl kaum je würde messen können. Auch war zu seiner Zeit nicht klar, ob es überhaupt Ereignisse im Weltall geben könnte, die messbar starke Raumbeben würden auslösen können. Faszinierend ist dabei, dass dennoch Einsteins Schlussfolgerungen logisch so zwingend waren, dass Wissenschaftler ein Jahrhundert lang daran gearbeitet haben, um Gravitationswellen nachweisen zu können. Und sie haben dabei keine Mühen und Kosten gescheut, die mehrere Kilometer langen, unglaublich empfindlichen Interferometer zu konstruieren, die jetzt in den USA, in Deutschland und in Italien stehen, und die tatsächlich im September 2015, ziemlich genau einhundert Jahre nach Einsteins kühner Vorhersage, tatsächlich Gravitationswellen gefunden haben.

Die Quelle des Raumbebens, das sie damals entdeckten, konnten sie in der Raumzeit genau orten: es liegt 1,3 Milliarden Lichtjahre entfernt in den Tiefen des Weltalls (das ist fast ein Zehntel des Gesamtdurchmessers des Weltalls); und es fand vor 1,3 Milliarden Jahren statt, denn Gravitationswellen breiten sich genau mit Lichtgeschwindigkeit aus. Ausgelöst wurde es dadurch, dass zwei sehr massive schwarze Löcher, jedes einige zig Sonnenmassen schwer, ineinanderstürzten. Die Energie des von diesem Ereignis ausgelösten Bebens, die in Form von Gravitationswellen ins umgebende Weltall abgestrahlt wurde, entsprach etwa drei Sonnenmassen. Zum Vergleich: bei dem oben erwähnten großen Erdbeben war das die Masse von zwei Hühnereiern. Und nur, weil die frei gewordene Energie so unvorstellbar groß war, konnten wir den Nachhall im Herbst 2015 hier, über eine Milliarde Lichtjahre entfernt, mit den empfindlichsten je gebauten Instrumenten, tatsächlich noch ›hören‹.

Das ist die eine Seite der Medaille. Die andere Seite der Medaille ist diese: dass man derart empfindliche Instrumente braucht, um das von Einstein entwickelte, völlig neue Konzept der gekrümmten Raumzeit experimentell zu verifizieren, dass man die winzige Abweichung der Merkurbahn von einer gewöhnlichen Bahnellipse bemerken muss, um festzustellen, dass die Newtonsche Mechanik nicht die ganze Wahrheit sein kann, bedeutet ja auch, dass letztere für alle praktischen Probleme vollkommen ausreichend ist. Die Gesetze der Mechanik, nach denen beispielsweise Giuseppe Sardi um 1678 die Baustatik der Kirche Santa Maria Zobenigo berechnete, gelten heute nach wie vor und werden, von einigen materialwissenschaftlichen Verfeinerungen und methodischen Errungenschaften des digitalen Zeitalters abgesehen, auch genauso verwendet wie damals. Für die Architektur, und auch für alle ähnlich praktischen Anwendungen, sind sie bei weitem hinreichend genau.

Tatsächlich sind sie sogar deutlich überlegen. So elegant die Einsteinsche Idee, Bewegung auf Geometrie zurückzuführen, auch sein mag, und so perfekt sie sich auch im Bereich der Himmelsmechanik bewährt hat, weist sie dennoch einen schweren Mangel auf: sie beschreibt in dieser Form lediglich die Wirkung der Gravitation. Alle anderen Wechselwirkungen, vor allem die elektromagnetische, die Atomen, Molekülen und allen Materialien, Wasser, Gestein, auch den Baumaterialien von Sardi bis heute, ihre Form, Dichte und Stabilität verleiht, sind in ihr nicht enthalten. Für Architektur z. B. wäre sie also völlig untauglich. Bereits kurz nach Einsteins Entdeckung begannen daher Theodor Kaluza und Oskar Klein durch Verallgemeinerung des Raumzeitbegriffs (Betrachtung höherdimensionaler Räume) die elektromagnetische Wechselwirkung in das Einsteinsche Bild zu integrieren.⁹ Gelänge dies, hätte man mit der (entsprechend modifizierten) Einsteinschen Formel eine knappe, elegante Zusammenfassung aller überhaupt möglichen Naturvorgänge.

Es gelang aber nicht. Es ist nämlich vor rund einhundert Jahren in der Physik etwas noch viel Gravierenderes passiert, in dem ebenfalls Albert Einstein eine große Rolle gespielt hat. Auch hier ist das sehr genaue Hinsehen, unter Verwendung der besten Apparaturen, von zentraler Bedeutung. Dass Glut umso bläulicher erscheint, je heißer der glühende Gegenstand ist, weiß man zwar, seit der Mensch gelernt hat, das Feuer zu zähmen. Die genaue Form des Farbspektrums aber, also wieviel Licht welcher Farbe ab-

⁹ Konzeptionell führte dieser Ansatz zu den heute noch studierten Stringtheorien.

gestrahlt wird, das war bis zu Beginn des 20. Jahrhunderts unverstanden geblieben. Und dieses Spektrum war für die Produktion von Glühlampen relevant, weshalb es immer wieder untersucht wurde. So kam auch Max Planck dazu, das Farbspektrum glühender Gegenstände ganz besonders genau zu vermessen. Und was er fand, konnte er nur erklären, wenn er annahm, dass das Licht in einzelnen Energiepaketen daherkam, also quantisiert war.

An und für sich ist Quantisierung von jeher nichts Ungewohntes. Seit Demokrit sind wir gewohnt, Materie als aus einzelnen *Materiequanten*, den Atomen, zusammengesetzt zu denken. Wir haben das später verfeinert in eine ganze Hierarchie aus Atomen, Molekülen, Kristallverbänden etc. Dass es kleinste Bausteine der Materie gibt, ist der Menschheit also schon lange geläufig. Unerwartet aber war es, dass dasselbe auch für Licht gelten sollte, weil man Licht als Wellenphänomen kannte: durch einfache Beugungsexperimente kann jeder leicht nachprüfen, dass Licht aus interferenzfähigen Wellen besteht. Man schaue nur einmal durch eine fein gewebte Gardine auf eine räumlich scharfe Lichtquelle: die Mehrfachbilder der Quelle, die in Kett- und Schussfadenrichtung erscheinen, und deren Position nicht davon abhängt, wie weit das Auge von der Gardine entfernt ist, sind eine Folge der Beugung der Lichtwelle an dem regelmäßigen Gitter der Fäden. Sie legen ein unabweisbares Zeugnis von der Wellennatur des Lichts ab, denn Beugung ist ein reines Interferenzphänomen. Nun aber sollte man akzeptieren, dass das Licht in einzelnen Paketen, sogenannten *Photonen*, quantisiert ist? Die Energie eines Photons, so ergab sich aus den Messungen, ist dabei streng proportional zur Frequenz der Lichtwelle. Die Proportionalitätskonstante trägt den Namen *Plancksches Wirkungsquantum*.

Die Entwicklung der Quantenmechanik, die dieser Entdeckung folgte, ist eine beispiellose Erfolgsgeschichte der Physik, wenn man betrachtet, was dadurch erstmals schlüssig erklärt werden konnte. Erstmals verstand man auch die aus einzelnen Frequenzen bestehenden Spektren glühender Gase, man verstand die innere Physik der Atome, man konnte eine geschlossene Theorie der inneren Struktur und der Eigenschaften fester Körper entwickeln. Aber unsere Konzeption der Realität hatte dafür einen hohen Tribut zu zahlen: die Idee, dass die Welt so ist wie sie ist, ein *Ding an sich*, das uns nur mehr oder weniger genau zu beobachten anheimgestellt ist, musste, so stellte sich heraus, aufgegeben werden. Vielmehr erwies sich der Beobachter als konzeptionell integraler Bestandteil der Beobachtung, ja des Beobachtungsgegenstands selbst. Ähnlich wie das Fließen der Zeit sich als vom Beobachter gemacht erweist, ist auch die Beobachtung selbst zu einem gewissen Teil ein Werk des Beobachters.

So gravierend dies für unser Weltbild ist, ein weiterer Aspekt dieser neuen Sichtweise ist für unsere Betrachtungen hier von noch größerer Bedeutung. Ebenso, wie sich nämlich das Wellenphänomen Licht gleichzeitig auch als ein Quantenphänomen erwies, muss auch das Quantenphänomen Materie (Atome!) gleichzeitig als ein Wellenphänomen betrachtet werden. Es ist ein unabweisbares Ergebnis, und durch die stupenden Erfolge der Quantenmechanik bestens experimentell belegt, dass Materie ganz allgemein Wellencharakter hat. Noch pointierter: Ereignisse und Prozesse, auch ganz materiell messbare, haben (auch) Wellencharakter. Das bedeutet, dass verschiedene Prozesse, die zu demselben messbaren Ergebnis führen, sich überlagern können; so wie zwei Lichtstrahlen, die durch zwei benachbarte Maschen in der Gardine hindurchgetreten sind, sich am Ort des Auges überlagern. Man beschreibt daher die Wahrscheinlichkeit, eine bestimmte Beobachtung zu machen, mit einer *Wahrscheinlichkeitsamplitude*. Sie wird als Wellenphänomen gedacht und unterscheidet sich von der Wahrscheinlichkeit dadurch, dass sie z. B. auch negativ sein kann.

Und wieder ist man versucht, Aristoteles und Ockham zu folgen und eine möglichst elegante und knappe Formulierung zu finden. In diesem Falle lautet sie: *Die Wahrscheinlichkeitsamplitude eines Vorgangs ist gegeben durch e^{iS} , wobei S die sog. mechanische Wirkung des Vorgangs ist, gemessen in Einheiten des Wirkungsquantums.*¹⁰ Das ist immer noch ein recht bündiger Satz, darin kann er neben der Newtonschen und der Einsteinschen Formulierung durchaus bestehen. Seine Tücken beginnt er zu offenbaren, sobald wir die Wirkung S in Beziehung setzen zu messbaren Größen, die also tatsächlichen Experimenten zugänglich sind. Die zu einem Vorgang gehörende Wirkung S ist dann das über den gesamten Vorgang erstreckte Linienintegral über die sogenannte Lagrangedichte L . Und diese enthält nun alles, was wir heute über die in der Natur auftretenden Wechselwirkungen wissen. Sie lautet $L = -e^\lambda(g\delta + m^1_\rho) e^\lambda - u^j_\rho(g\delta + m^1_\rho) u^j_\rho + X^+(d^2 - M^2)X^+$... und so weiter, und zwar etwa eine eng beschriebene DIN-A4-Seite lang!

Aber nicht nur, dass hier von Eleganz und Knappheit keine Rede mehr sein kann, es gibt auch trotz jahrzehntelanger, intensiver Forschung zurzeit noch keine vielversprechende Idee, wie diese Beschreibung der Wechselwirkungen mit der Gravitationstheorie Albert Einsteins, also der Allgemeinen Relativitätstheorie, in Einklang zu bringen wäre. Zwar versuchen die sogenannten Stringtheorien genau das, aber es ist bis dato nicht absehbar, dass diese jemals experimentell überprüfbar Vorhersagen

10 e ist die Euler'sche Zahl (2,71828...), i die imaginäre Einheit ($i^2 = -1$).

machen werden. Und damit steht der Sinn dieses Unterfangens ohnehin grundsätzlich in Frage. Müssen wir uns von der Idee, die Natur müsse in ihrer innersten Struktur elegant und einfach sein, also verabschieden?

So sieht es tatsächlich aus, denn es kommt noch schlimmer. Kehren wir noch einmal zu dem Blick ins Weltall zurück, der in Abb. 5 gezeigt ist. Auch hier sind die Beobachtungsinstrumente stetig verbessert worden und man kann Szenerien, wie die hier gezeigte, vor allem ihre Dynamik, also die Details der Relativbewegungen der Materie, heute mit extrem hoher Genauigkeit beobachten und vermessen. Und was man dabei in den letzten Jahren fand, war sehr verblüffend: nur etwa fünf Prozent der Masse, die sich im Universum befindet, besteht aus der Materie, wie wir sie kennen! Der Rest entfällt größtenteils auf die sogenannte *Dunkle Energie*, über deren Beschaffenheit man so gut wie nichts weiß. Die gesamte Physik, die wir für die in unserer Lebenswelt vorfindlichen Stoffe ersonnen haben, gilt also nur für ein Zwanzigstel dessen, was sich ›da draußen‹ befindet. Wir sind mit unserer Weisheit, was die Beschreibung der gesamten Natur betrifft, offenbar nicht nur viel weiter vom Ziel entfernt, als man um die Wende zum 20. Jahrhundert noch dachte; wir stehen gerade erst am Anfang!

So hat uns die Frage nach dem Fließen von Zeit und Materie in der Physik auf eine Reise geschickt, in deren Verlauf wir einiges haben einstürzen sehen, was zuvor fest gefügt schien. Das Fließen der Zeit: kein unumstößliches Gesetz, sondern unser eigenes Werk. Der absolute Raum: kein unverrückbarer Rahmen allen Geschehens, sondern ein fließendes Gebilde, wesensgleich mit der Zeit, ewig tanzend mit der ihn durchsetzenden Materie. Und die Idee, die Natur müsse ihrem Wesen nach im Innern elegant und einfach sein: keine göttliche Ordnung, sondern nur ein naiver menschlicher Traum.

Nicht eingestürzt sind die schönen alten Fassaden Venedigs. Sie wurden nach Gesetzmäßigkeiten gebaut, die auch im Lichte der modernen Physik noch hinreichend genau sind, um praktische Angelegenheiten wie Architektur und Städtebau zu meistern. Und so, wie sich die Dinge gegenwärtig entwickeln, werden sie noch stehen, wenn die alte Mutter Erde ihre schwere *Homo-Sapiens*-Infektion bereits lange wird überstanden haben.

Bildnachweise:

Abb. 1–4: selbst erstelltes Bildmaterial des Autors, Urheberrechte bei Stephan Herminghaus
Abb. 5: The Pillars of Creation, NASA, Weltraumteleskop Hubble, Datei gemeinfrei gemäß NASA-Urheberrechtsrichtlinie, https://en.wikipedia.org/wiki/File:Pillars_of_creation_2014_HST_WF3-UVIS_full-res_denoised.jpg (letzter Zugriff: 15.07.2024)