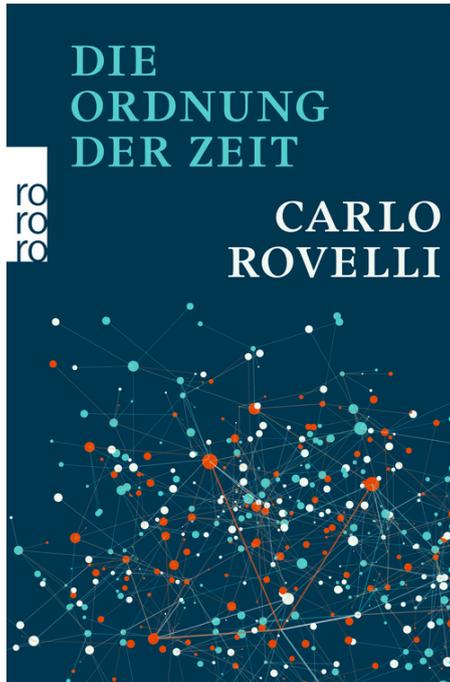


Leseprobe aus:



ISBN: 978-3-499-63271-6

Mehr Informationen zum Buch finden Sie auf www.rowohlt.de.

Carlo Rovelli, geboren 1956 in Verona, ist seit 2000 Professor für Physik an der Universität Marseille. Zuvor forschte und lehrte er unter anderem am Imperial College London, der Universität Rom, der Yale University, an der Università dell' Aquila und an der University of Pittsburgh. 1998/99 war er Forschungsdirektor am Zentrum für Theoretische Physik (CPT) in Luminy. Zusammen mit Lee Smolin entwickelte er die Theorie der Schleifenquantengravitation, die international als verheißungsvollste Theorie zur Vereinigung von Einsteins Gravitationstheorie und der Quantentheorie gilt.

Warum stehen wir mit den Füßen auf dem Boden? Newton meinte, weil sich Massen anziehen, Einstein sagte, weil sich die Raumzeit krümmt. Carlo Rovelli hat eine andere Erklärung: vielleicht ja deshalb, weil es uns immer dorthin zieht, wo die Zeit am langsamsten vergeht. Wenn, ja wenn es so etwas wie Zeit überhaupt gibt. Kaum etwas interessiert theoretische Physiker von Rang so sehr wie der Begriff der Zeit. Leben wir in der Zeit oder lebt die Zeit vielleicht nur in uns? Warum der physikalische Zeitbegriff immer weiter schwimmt, je mehr man sich ihm nähert, warum es im Universum keine allgemeine Gegenwart gibt, warum die Welt aus Geschehnissen besteht und nicht aus Dingen und warum wir Menschen dennoch gar nicht anders können, als ein Zeitbewusstsein zu entwickeln: Rovelli nimmt uns mit auf eine Reise durch unsere Vorstellungen von der Zeit und spürt ihren Regeln und Rätseln nach.

«Der Physiker Carlo Rovelli erklärt, warum unsere Vorstellungen von der Zeit völlig falsch sind.» *Die Zeit*

Carlo Rovelli

Die Ordnung der Zeit

Aus dem Italienischen von Enrico Heinemann

Rowohlt Taschenbuch Verlag

Veröffentlicht im Rowohlt Taschenbuch Verlag, Hamburg, März 2021
Copyright © 2018 by Rowohlt Verlag GmbH, Reinbek bei Hamburg
L'ordine del tempo © 2017 by Adelphi Edizioni S. P. A. Milano
Covergestaltung zero-media.net, München, nach
dem Entwurf von Anzinger und Rasp, München
Coverabbildung FrankRamspott / Getty Images
Satz aus der Clifford PostScript (InDesign)
bei Pinkuin Satz und Datentechnik, Berlin
Druck und Bindung CPI books GmbH, Leck, Germany
ISBN 978-3-499-63271-6

Die Rowohlt Verlage haben sich zu einer nachhaltigen
Buchproduktion verpflichtet. Gemeinsam mit unseren Partnern
und Lieferanten setzen wir uns für eine klimaneutrale
Buchproduktion ein, die den Erwerb von Klimazertifikaten
zur Kompensation des CO₂-Ausstoßes einschließt.

www.klimaneutralerverlag.de



Das wohl größte Geheimnis ist die Zeit

Da wir noch sprechen, ist schon
entflohen die neidische
Zeit: greif diesen Tag, nimmer traue dem nächsten! (I,
11)

Ich halte inne. Nichts geschieht. An nichts denkend, lausche ich dem Verrinnen der Zeit.

Das ist die Zeit. Bekannt und vertraut. Unaufhaltsam zieht sie uns mit sich fort. Im reißenden Fluss der vergehenden Sekunden, Stunden und Jahre stürzen wir dem Leben und dann dem Nichts entgegen ... Wie die Fische im Wasser schwimmen wir in der Zeit. Unser Sein ist eines in der Zeit. Ihre Elegie gibt uns Nahrung, eröffnet uns die Welt, verwirrt uns, erschreckt uns, wiegt uns in den Schlaf. Im Schlepptau der Zeit und nach der Ordnung der Zeit entfaltet sich das Universum in seinem Werden.

Die Hindu-Mythologie fängt das Entstehen und Vergehen im Kosmos im Bild des tanzenden Shiva ein: Sein Tanz regiert den Lauf des Universums und den Fluss der Zeit. Was könnte universeller und augenfälliger sein als dieses Fließen?

Dennoch liegen die Dinge komplizierter. Die Wirklichkeit ist häufig anders, als sie erscheint: Obwohl flach anmutend, hat die Erde Kugelgestalt. Auch wenn die Sonne über den Himmel zu ziehen scheint, drehen in Wahrheit wir uns. Auch die Struktur der Zeit ist anders, als es scheint: Sie ist kein gleichförmiger Ablauf. Darauf stieß ich verblüfft in Physikbüchern an der Universität. Die Zeit funktioniert anders, als wir sie wahrnehmen.

Entdeckt habe ich in diesen Büchern auch, dass wir noch gar nicht wissen, wie die Zeit wirklich funktioniert. Das Wesen der Zeit ist wohl immer noch das größte Geheimnis, eines, das über seltsame Fäden mit weiteren großen ungelösten Rätseln verbunden ist: das Wesen des Geistes, der Ursprung des Universums, das Schicksal Schwarzer Löcher oder die Funktionsweise von Leben. Wesentliches führt immer wieder zum Wesen der Zeit zurück.

Staunen ist die Quelle unseres Erkenntnisdrangs.¹ Und die Entdeckung, dass die Zeit anders ist, als wir dachten, wirft tausend Fragen auf. Das Wesen der Zeit stand Zeit meines Lebens im Zentrum meiner Forschungen in theoretischer Physik. Auf den nachfolgenden Seiten erzähle ich, was wir von der Zeit begriffen haben, auf welchen Wegen wir uns bewegen, um mehr zu verstehen, was wir noch nicht verstehen und welches Verständnis sich für mich abzuzeichnen scheint.

Warum erinnern wir uns an die Vergangenheit und nicht an die Zukunft? Leben wir in der Zeit oder lebt die Zeit in uns? Was bedeutet es eigentlich, dass Zeit «vergeht»? Was verbindet die Zeit mit unserem Wesen als Subjekte?

Was verfolge ich eigentlich, wenn ich dem Lauf der Zeit folge? Dieses Buch hat drei ungleiche Teile. Im ersten fasse ich zusammen, was die moderne Physik von der Zeit verstanden hat. Das ist so, als halte man eine Schneeflocke in Händen: Je länger wir sie betrachten, desto mehr schmilzt sie dahin, bis sie am Ende ganz verschwunden ist. Wir sehen die Zeit gewöhnlich als etwas Einfaches, Grundlegendes, das sich unbeeindruckt von allem in einem gleichförmigen Fluss bewegt, gemessen von Uhren, von der Vergangenheit in die Zukunft. Im Verlauf der Zeit folgen die Ereignisse des Universums der Reihe nach aufeinander: vergangene, gegenwärtige,

zukünftige. Die Vergangenheit steht fest, die Zukunft ist offen ... Schön: Dies alles hat sich als falsch erwiesen.

Die kennzeichnenden Aspekte der Zeit haben sich einer nach dem anderen als reine Näherungen erwiesen, als Täuschungen, die ähnlich der von der flachen Erde oder der rotierenden Sonne der Perspektive geschuldet sind. Unser wachsendes Wissen hat eine Auflösung des Zeitbegriffs herbeigeführt. Was wir «Zeit» nennen, ist eine komplexe Ansammlung aus Strukturen² oder verschiedenen Schichten. Immer gründlicher untersucht, hat die Zeit diese Schichten eine nach der anderen verloren. Von dieser Auflösung der Zeit erzählt der erste Teil des Buchs.

Der zweite Teil beschreibt, was am Ende übrigbleibt. Eine leere, vom Wind durchfegte Landschaft, aus der fast jede Spur von Zeitlichkeit verschwunden ist. Eine seltsame, fremde Welt, die aber unsere ist. Als sei man ins Hochgebirge hinaufgestiegen, wo es nur noch Schnee, Felsen und den Himmel gibt. Oder wie es wohl Armstrong und Aldrin erlebt haben, als sie sich auf den reglosen Sand des Mondes hinauswagten. Eine ätherische Welt, die in arider, klarer und beunruhigender Schönheit erglänzt. Die Physik, an der ich arbeite, die Quantengravitation, bemüht sich um ein zusammenhängendes Verständnis dieser extremen und wunderschönen Landschaft: der Welt ohne Zeit.

Der dritte Teil des Buchs ist der schwierigste, aber auch der lebendigste, der uns am nächsten steht. In der Welt ohne Zeit muss es doch etwas geben, aus dem die Zeit hervorgeht, die uns mit ihrer Ordnung, mit dem Unterschied zwischen Vergangenheit und Zukunft und ihrem sanften Fluss vertraut ist. Unsere Zeit muss irgendwie um uns, im uns vertrauten Maßstab, für uns entstehen.³

Dies ist die Rückreise zu der Zeit, die im ersten Teil, auf der Suche nach der Basissprache der Welt, verloren gegangen ist. Wie im Kriminalroman fahnden wir nach dem Schuldigen, der die Zeit entstehen ließ. Wir begegnen nacheinander den Stücken wieder, aus denen sich die uns vertraute Zeit zusammensetzt, nicht als elementare Strukturen der Realität, sondern als nützliche Näherungen für uns Sterbliche, die wir die Wirklichkeit nur grob und unbeholfen wahrnehmen, als Aspekte unserer Perspektive und vielleicht auch – entscheidende – Aspekte dessen, was wir selbst sind. Denn vielleicht betrifft das Geheimnis der Zeit am Ende eher unsere Verfassung als Menschen als den Kosmos. Vielleicht stellt sich wie im ersten und bedeutendsten aller Kriminalstücke – Sophokles' *König Ödipus* – sogar der Detektiv als der Täter heraus.

Hier entwickelt sich das Buch zu einem Strom glühender Lava aus Ideen, zuweilen klaren, zuweilen konfusen. Wenn mir der Leser folgt, führe ich ihn nach dort, wohin unser gegenwärtiges Wissen über die Zeit strebt, bis zum großen nächtlichen und von Sternen überglänzten Ozean dessen, was wir noch nicht wissen.

Erster Teil

Der Zerfall der Zeit

1. Der Verlust der Einheitlichkeit

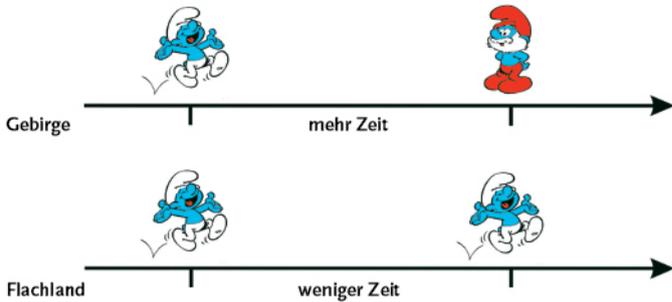
Schon führt Kytheras Venus an die Chöre, darüber schwebt Luna,
es reihen sich ein den Nymphen die Grazien, die holden,
wechselnd den Grund berührt ihr Fuß [...] (I, 4)

Die Verlangsamung der Zeit

Ich beginne mit einer schlichten Tatsache: Im Gebirge vergeht die Zeit schneller als im Flachland.

Der Unterschied ist gering, lässt sich aber mit präzisen Uhren, wie man sie heute im Internet für rund tausend Euro kaufen kann, durchaus messen. Mit ein wenig Übung kann sich jeder von dieser Verzögerung des Zeitablaufs selbst überzeugen. Mit speziellen Laboruhren ist sie schon bei einem Höhenunterschied von wenigen Zentimetern beobachtbar: Die Uhr auf dem Boden geht einen verschwindend geringen Tick langsamer als die auf dem Tisch.

Und das ist nicht den Uhren geschuldet. Prozesse laufen unten langsamer ab. Zwei Freunde gehen auseinander: Der eine übersiedelt in die Berge, der andere bleibt im Tiefland. Nach Jahren treffen sie sich wieder: Der Freund unten hat weniger lang gelebt und ist weniger stark gealtert. Das Pendel seiner Kuckucksuhr hat weniger Schwingungen absolviert. Er hat weniger Zeit für Erledigungen gehabt. Seine Pflanzen sind langsamer gewachsen. Und er hatte weniger Zeit zum Nachdenken ...
Unten vergeht die Zeit langsamer als oben.



Überraschend? Vielleicht. Aber so ist die Welt beschaffen. Die Zeit vergeht mancherorts langsamer, anderenorts schneller.

Wahrhaft überraschend ist, dass jemand diese Verzögerung des Zeitablaufs schon ein Jahrhundert früher erkannt hat, als es Uhren gab, die sie messen konnten: Einstein.

Die Fähigkeit, Dinge zu verstehen, ehe man sie beobachten kann, bildet den Kern wissenschaftlichen Denkens. In der Antike erkannte Anaximander (um 610–547 v. Chr.), dass der Himmel unter unseren Füßen hindurch weitergeht, noch ehe Schiffe Weltumsegelungen unternahmen. Zu Beginn der Neuzeit entdeckte Kopernikus (1473–1543), dass sich die Erde dreht, noch ehe Astronauten vom Mond aus ihre Rotation beobachten konnten. Und so erkannte Einstein (1879–1955), dass die Zeit nicht gleichförmig vergeht, noch bevor die Uhren genau genug gingen, um den Unterschied zu messen.

In Schritten voran wie diesen stellt sich scheinbar Selbstverständliches als reines Vorurteil heraus. Der Himmel, so schien es, befand sich *selbstverständlich* nur oben, nicht unten, weil eine frei schwebende Erde herabfallen müsste. Die Erde – so schien es – steht *selbst-*

verständlich still, was herrschte sonst für ein Chaos. Die Zeit, so schien es, vergeht überall gleich schnell, das versteht sich von selbst ... Heranwachsende Kinder lernen, dass die Welt nicht ganz so ist, wie sie zu Hause zwischen den vier Wänden erscheint. Diese Erfahrung macht auch die Menschheit als Ganzes.

Einstein stellte sich eine Frage, die sich wohl schon viele von uns stellten, als sie sich mit der Schwerkraft auseinandersetzten: Wie gelingt es Sonne und Erde, sich wechselseitig «anzuziehen», ohne sich zu berühren oder ein Medium für ihre Anziehung zu nutzen? Auf der Suche nach einer plausiblen Erklärung kam Einstein auf den Gedanken, dass sich Sonne und Erde nicht direkt wechselseitig anziehen, sondern unterschiedlich stark auf das einwirken, was einzig zwischen ihnen liegt: auf Raum und Zeit. Sonne und Erde mussten um sich herum Raum und Zeit in gleicher Weise verändern, wie ein eintauchender Körper das Wasser um sich verdrängt. Und diese Veränderung der Struktur der Zeit wirkt ihrerseits auf die Bewegung sämtlicher Körper ein. Sie sorgt dafür, dass sie aufeinander «zufallen».⁴

Was heißt «Veränderung der Struktur der Zeit»? Es bedeutet, dass, wie oben beschrieben, die Zeit verlangsamung abläuft: Jeder Körper verlangsamt das Vergehen der Zeit in seiner näheren Umgebung. Die Erde ist eine große Masse und bremst den Zeitablauf in ihrer Nähe: stärker im Tiefland und weniger stark im Gebirge, weil die Dinge oben vom Schwerpunkt der Erde weiter entfernt sind. Deswegen altert der Freund im Flachland langsamer.

Wenn Dinge fallen, so wegen dieser Verlangsamung der Zeit. Wo die Zeit gleichförmig vergeht, im interplanetaren Raum, bleiben die Objekte, ohne zu fallen, in der Schweben. Hier auf der Oberfläche unseres Planeten streben Dinge natürlicherweise dorthin, wo die Zeit langsa-

mer vergeht, ungefähr so, wie wenn wir vom Strand aus ins Meer laufen und dann wegen des Wasserwiderstands an den Füßen mit dem Gesicht nach vorn in die Wellen platschen. Die Dinge fallen nach unten, weil der Zeitablauf in tieferen Lagen von der Erde stärker gebremst wird.⁵

Obwohl sie eher schwer zu beobachten ist, hat die Verlangsamung der Zeit beachtliche Auswirkungen: Sie lässt Dinge herabfallen und hält uns mit den Füßen auf der Erde. Wenn wir auf dem Boden stehen, so deshalb, weil der gesamte Körper natürlicherweise dorthin strebt, wo die Zeit langsam vergeht. Und an den Füßen läuft sie langsamer ab als am Kopf.

Seltsam? Dasselbe Gefühl empfindet man bei der Beobachtung, wie die sinkende Abendsonne allmählich fröhlich hinter fernen Wolken verschwindet – während man sich erstmals bewusst macht, dass nicht die Sonne, sondern die Erde sich dreht. Mit den törichten Augen des Verstandes sehen wir, wie sich unser gesamter Planet mit uns obenauf von der Sonne aus gesehen nach hinten wegdreht. Diese Augen des törichten Narren auf dem Berg, die Paul McCartney besingt,⁶ sehen weiter als unsere verschlafenen Alltagsaugen.

Zehntausend tanzende Shivas

Ich habe ein Faible für Anaximander, den griechischen Philosophen, der vor sechsundzwanzig Jahrhunderten erkannte, dass die Erde, aufgehängt im Nichts, gleichsam im Raume schwebt.⁷ Auch wenn uns sein Denken nur über andere überliefert ist, blieb ein einziges Fragment seiner Schriften erhalten:

(Woraus aber für das Seiende das Entstehen ist, dahin- ein erfolgt auch ihr Vergehen) gemäß der Notwendigkeit; denn sie schaffen einander Ausgleich und zahlen

Buße für ihre Ungerechtigkeit nach der Ordnung der Zeit.

«Nach der Ordnung der Zeit» (κατα τήν του χρόνου τάξιν). Allein diese rätselhaften, geheimnisvoll klingenden Worte blieben uns von einem Gründungsmoment der Naturwissenschaften erhalten.

Astronomie und Physik haben sich nach Anaximanders Hinweis weiterentwickelt: zu verstehen, wie die Phänomene *nach der Ordnung der Zeit* geschehen. Die antike Astronomie hat die Bewegungen der Gestirne *in der Zeit* beschrieben. Die Gleichungen der Physik beschreiben, wie sich die Dinge *mit der Zeit* verändern. Von den Gleichungen Newtons, welche die Bewegungslehre begründeten, bis zu denen Maxwells, welche die elektromagnetischen Phänomene beschreiben; von der Schrödinger-Gleichung, die beschreibt, wie sich die Quantenphänomene entwickeln, bis zu denen der Quantenfeldtheorie, welche die Bewegung der subatomaren Teilchen beschreiben: Unsere gesamte Physik ist die Wissenschaft davon, wie sich die Dinge «nach der Ordnung der Zeit» verändern.

Nach althergebrachter Konvention geben wir diese Zeit mit dem Buchstaben t (dem Anfangsbuchstaben für «Zeit» im Französischen, Englischen, Spanischen und Italienischen, nicht aber im Deutschen, Arabischen, Russischen oder Chinesischen) wieder. Was gibt t an? Einen mit der Uhr gemessenen Zahlenwert. Die Gleichungen sagen uns, wie sich die Dinge verändern, während die Zeit vergeht.

Aber wenn verschiedene Uhren jeweils andere Zeiten angeben, wie wir oben sahen, was gibt t dann an? Wenn sich die beiden Freunde wiedersehen, von denen der eine in den Bergen und der andere im Flachland gelebt hat, zeigen ihre Armbanduhren doch unterschiedliche

Zeiten an. Welche der beiden ist t ? Zwei Uhren in einem Physikkolabor gehen mit unterschiedlicher Geschwindigkeit, wenn die eine auf dem Tisch und die andere am Boden steht: Welche von beiden zeigt die richtige Zeit? Wie beschreibt man den unterschiedlichen Takt der beiden Uhren? Müssen wir sagen, dass die Uhr am Boden gegenüber der richtigen, auf dem Tisch gemessenen Zeit nachgeht? Oder geht die Uhr auf dem Tisch gegenüber der richtigen, am Boden gemessenen Zeit vor?

Die Frage ist sinnlos. Sie ist so, als fragte man sich, ob ein in englischen Pfund angegebener Wert *richtiger* sei als ein in US-Dollar ausgedrückter. Es gibt keinen richtigen Wert, sondern nur zwei Währungen, deren Wert sich an der jeweils anderen bemisst. Es gibt keine richtige Zeit, sondern zwei von verschiedenen realen Uhren angezeigte Zeiten, die unterschiedlich *zueinander* ablaufen. Keine ist richtiger als die andere.

Ja es gibt nicht einmal nur *zwei*, sondern Heerscharen verschiedener Zeiten: jeweils eine für jeden Punkt des Raumes. Es gibt nicht eine einzige, sondern zahllose Zeiten.

Die Zeit, die von einer bestimmten Uhr angegeben wird, gemessen anhand eines besonderen Phänomens, heißt in der Physik «Eigenzeit».

Jede Uhr hat ihre Eigenzeit. Jedes sich ereignende Phänomen hat seine Eigenzeit, seinen eigenen Rhythmus. Einstein hat uns gelehrt, die Gleichungen zu erstellen, die beschreiben, wie eine Eigenzeit *jeweils in Bezug zu einer anderen* abläuft. Er hat uns gelehrt, die Differenz zwischen zwei Zeiten zu berechnen.⁸

Die einzelne Größe «Zeit» zerfällt in ein Spinnennetz aus Zeiten. Wir beschreiben nicht, wie die Welt sich in der Zeit entwickelt, sondern wie sich die Dinge in lokalen Zeiten entwickeln und wie eine örtliche Zeit *jeweils in Bezug zur anderen* abläuft. Die Welt verhält sich nicht

wie eine Marschkolonne, die in einem vom Kommandanten vorgegebenen Tempo voranrückt. Sie ist ein Netzwerk aus Ereignissen, die sich wechselseitig beeinflussen.

So zeichnet Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie die Zeit. Deren Gleichungen kennen nicht eine, sondern zahllose Zeiten. Zwischen zwei Ereignissen wie der Trennung und der Wiederbegegnung zweier Uhren gibt es keine einheitliche Dauer.⁹ Die Physik beschreibt nicht, wie sich die Dinge «im Verlauf der Zeit» verändern, sondern wie sie sich im Verlauf ihrer jeweiligen Zeit verändern und wie die Zeiten in Bezug zueinander ablaufen.¹

Die Zeit hat ihre erste Schicht verloren: ihre Einheitlichkeit. An jedem Ort hat die Zeit einen anderen Rhythmus, einen anderen Ablauf. Die Dinge der Welt tanzen in unterschiedlichen Rhythmen durcheinander. Wenn der Ablauf der Welt vom tanzenden Shiva regiert wird, muss es Zehntausende tanzende Shivas geben, einen großen gemeinschaftlichen Tanz wie auf einem Gemälde von Matisse ...

1 Ein terminologischer Hinweis: Der Begriff «Zeit» wird in unterschiedlichen, wenn auch miteinander zusammenhängenden Bedeutungen verwendet: 1. «Zeit» ist das allgemeine Phänomen des Aufeinanderfolgens von Ereignissen («Die Zeit ist unerbittlich»). 2. «Zeit» gibt ein Intervall in dieser Abfolge («in der schönen Frühlingszeit») oder 3. eine Dauer («Wie lange hast du gewartet?») an. 4. «Zeit» kann auch einen bestimmten Augenblick angeben («Es ist Zeit zum Aufbruch»). 5. «Zeit» gibt die Variable an, welche die Dauer misst («Die Beschleunigung ist die Ableitung der Geschwindigkeit nach der Zeit»). In diesem Buch verwende ich den Ausdruck «Zeit» wie in der Alltagssprache unterschiedslos in allen genannten Bedeutungen. Sollte Verwirrung aufkommen, erinnere sich der Leser an diesen Hinweis.

2. Der Verlust der Richtung

Was, wenn du süßer noch als der thralische Orpheus,
vernehmlich bewegest sogar für Bäume die Saite?
Kehrt denn je zurück das Blut ins nichtige
Schattenbild [...]?
Hart! Doch leichter wird durch Geduld,
was zu verändern verwehrt ist. (I, 24)

Woher stammt der ewige Fluss?

Uhren gehen im Gebirge und auf Meereshöhe unterschiedlich schnell: Aber interessiert uns gerade das an der Zeit? An den Rändern des Flusses fließt das Wasser langsam und in der Mitte schnell, trotzdem ist es ein Strömen. Ist die Zeit nicht immerhin etwas, das von der Vergangenheit in die Zukunft verläuft? Lassen wir das genaue Maß, *wie viel* Zeit vergeht, mit dem ich mich im vorangegangenen Kapitel abgemüht habe, einmal beiseite, also diese Zahlen, in denen man Zeit misst. Es gibt einen wesentlicheren Aspekt: ihren Lauf, ihren Fluss, die *ewige Strömung* aus Rilkes *Duineser Elegien*:

Die ewige Strömung
reißt durch beide Bereiche alle Alter
immer mit sich
und übertönt sie in beiden.¹⁰

Vergangenheit und Zukunft sind verschieden. Ursachen gehen Wirkungen voraus. Der Schmerz folgt auf die Verletzung und nicht umgekehrt. Das Trinkglas zerspringt in tausend Scherben, aus denen sich keines mehr bildet. Wir können Vergangenes nicht ungeschehen machen, sondern allenfalls Bedauern oder Reue empfinden oder uns an glücklichen Erinnerungen erfreuen. Dage-

gen ist die Zukunft mit Ungewissheit, Wunschdenken oder Besorgnis verbunden. Sie ist offener Raum, vielleicht Schicksal. Wir können in sie hineinleben, sie wählen, da sie noch nicht ist. In ihr ist alles möglich. Die Zeit ist keine Achse mit zwei gleichwertigen Richtungen: Sie ist ein Pfeil mit unterschiedlichen Enden:



Dies ist uns an der Zeit wichtig, mehr noch als die Geschwindigkeit, mit der sie vergeht. Dies bildet ihren Kern. Dieses Kribbeln auf der Haut, das wir spüren, wenn wir uns vor der Zukunft fürchten oder die Erinnerung uns Rätsel aufgibt. Hier liegt das Geheimnis der Zeit verborgen: der Sinn dessen, was wir meinen, wenn wir an die Zeit denken. Was ist dieses Strömen? Wo in der tief liegenden Struktur der Welt ist es verankert? Was zwischen den Rädchen des Weltengetriebes unterscheidet die Vergangenheit mit ihrem Gewesen-Sein von der Zukunft mit ihrem Noch-nicht-gewesen-Sein? Warum ist Vergangenheit so ganz anders als Zukunft?

Mit diesen Fragen hat sich die Physik des 19. und des 20. Jahrhunderts herumgeschlagen und ist auf etwas gestoßen, das noch mehr überrascht und befremdet als nur die im Grunde nebensächliche Tatsache, dass Zeit an unterschiedlichen Orten in verschiedenem Tempo vergeht. Der Unterschied zwischen Vergangenheit und Zukunft - zwischen Ursache und Wirkung, Erinnerung und Hoffnung, Reue und Absicht - kommt in den Grundgesetzen, welche die Mechanismen der Welt beschreiben, überhaupt nicht vor.

Wärme

Alles begann mit einem Königsmord. Am 16. Januar 1793 fällt der Pariser Nationalkonvent das Todesurteil über Ludwig XVI., in einer Auflehnung gegen die herrschende Ordnung, die wohl auch ein grundlegender Antrieb von Wissenschaft ist.¹¹ Zu den Mitgliedern, die das verhängnisvolle Votum verkündeten, zählte Lazare Carnot, ein Freund Robespierres. Carnot hatte eine Leidenschaft für den großen persischen, aus Schiraz stammenden Dichter Saadi (um 1219–um 1292), der in Akkon Kreuzfahrern in die Hände gefallen und von ihnen versklavt worden war. Von ihm stammen auch die fabelhaften Verse, welche die Eingangshalle des UNO-Hauptquartiers in New York schmücken:

Die Adamssöhne sind ja alle Brüder,
aus einem Stoff wie eines Leibes Glieder.
Hat Krankheit nur ein einz'ges Glied erfasst,
so bleibt den andern weder Ruh noch Rast.
Wenn andrer Schmerz dich nicht im Herzen brennet,
verdienst du nicht, dass man noch Mensch dich nennet.
(Nachdichtung von Karl Heinrich Graf, 1846)

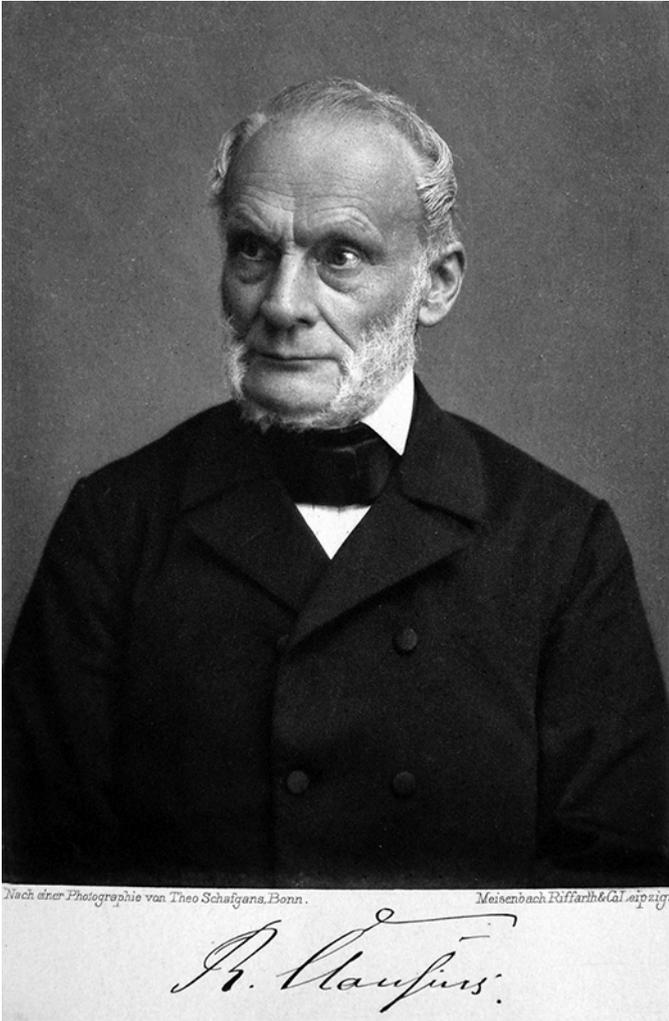
Eine tief verankerte Wurzel der Naturwissenschaft ist wohl die Poesie, die über das Sichtbare hinauszublicken weiß. Dem Dichter zu Ehren gab Carnot seinem ersten Sohn den Namen Sadi. Rebellion und Poesie brachten so einen Sadi Carnot (1796–1832) hervor.

Als Junge begeisterte sich Sadi für die Dampfmaschinen, die im 19. Jahrhundert die Welt zu verändern begannen, indem sie die Antriebskraft des Feuers nutzten.

Im Jahr 1824 schreibt Sadi Carnot ein Bändchen mit dem Titel *Betrachtungen über die bewegende Kraft des Feuers ...*, in dem er die theoretischen Grundlagen für

das Funktionieren dieser Maschinen zu ergründen versucht. Die kleine Abhandlung steckt voller fehlerhafter Annahmen: Carnot stellt sich Wärme als ein dingliches Etwas, eine Art Flüssigkeit vor, die dadurch Energie erzeuge, dass sie einem Wasserfall ähnlich Energie freisetzt, von den warmen zu den kalten Dingen «herabfalle». Aber ein Gedanke ist entscheidend: Dampfmaschinen funktionieren letztlich deshalb, weil Wärme vom Warmen ins Kalte übergeht.

Sadis Büchlein gelangt in die Hände des strengen preußischen Professors Rudolf Clausius (1822-1888). Und der erkennt den springenden Punkt und stellt ein Gesetz auf, das berühmt werden wird:



Wärme fließt natürlicherweise vom warmen zum kalten Körper; sie fließt nicht spontan vom kalten zum warmen Körper.

Das ist der entscheidende Unterschied zu fallenden Körpern: Ein herabgefallener Ball kann seine Bewegung umkehren, zum Beispiel durch den Rückprall. Wärme nicht.

Dieses von Clausius formulierte Gesetz ist das *einzig*e allgemeine der Physik, das zwischen Vergangenheit und Zukunft unterscheidet.

Bei keinem anderen ist dies der Fall: Ob Newtons Grundgleichungen der Mechanik, Maxwells Gleichungen der Elektrizität und des Magnetismus, Einsteins Relativitätstheorie der Gravitation, Heisenbergs Quantenmechanik, die Elementarteilchen Schrödingers und Diracs oder der Physiker des 20. Jahrhunderts: *Keine* dieser Gleichungen unterscheidet Vergangenheit von Zukunft.¹² Wenn die Gleichungen eine Abfolge von Ereignissen zulassen, ist diese auch rückwärts in der Zeit möglich.¹³ In den elementaren Gleichungen der Welt¹⁴ taucht der Zeitpfeil *nur* dann auf, wenn Wärme vorhanden ist.² Zwischen Zeit und Wärme besteht also eine tiefgreifende Beziehung: Wann immer ein Unterschied zwischen Vergangenheit und Zukunft zutage tritt, dann durch Wärme. An sämtlichen Phänomenen, die sich ins Absurde wandeln, wenn sie rückwärts abgespult werden, ist etwas sich Erwärmendes beteiligt.

Wenn ich einen Film betrachte, der einen rollenden Ball zeigt, kann ich nicht sagen, ob er vorwärts oder rückwärts läuft. Wenn der Ball im Film aber ausrollt und stehen bleibt, sehe ich, dass der Film richtig abgespult wird, weil er in umgekehrter Richtung unglaubliche

² Streng genommen, manifestiert sich der Zeitpfeil auch in Phänomenen, die nicht direkt mit Wärme zu tun haben, aber entscheidende Aspekte mit ihr teilen. Zum Beispiel beim Arbeiten mit dem retardierten Potenzial in der Elektrodynamik. Auch für solche Phänomene gelten die nachfolgenden Ausführungen und insbesondere die Schlussfolgerungen. Der Einfachheit halber verzichte ich darauf, alle Spezialfälle im Einzelnen zu erörtern.

Ereignisse zeigen würde: einen Ball, der sich von selbst in Bewegung setzt. Dass der Ball langsamer wird und schließlich stehen bleibt, ist der Reibung geschuldet, bei der Wärme entsteht. Nur wo Wärme ist, unterscheiden sich Vergangenheit und Zukunft. Gedanken entwickeln sich von der Vergangenheit in die Zukunft, nicht umgekehrt: Und tatsächlich erzeugt ein denkendes Gehirn Wärme ...

Clausius führt die Größe ein, die diesen unumkehrbaren Abfluss der Wärme nur in eine Richtung misst, und verpasst ihr – als gebildeter Deutscher – eine dem Griechischen entlehnte Bezeichnung: «so schlage ich vor, die Größe S nach dem griechischen Worte $\eta \tau\rho\omicron\pi\eta$, die Verwandlung, die *Entropie* des Körpers zu nennen.»¹⁵

390

so erhält man die Gleichung:

$$(64) \int \frac{dQ}{T} = S - S_0,$$

welche, nur etwas anders geordnet, dieselbe ist, wie die unter (60) angeführte zur Bestimmung von S dienende Gleichung.

Sucht man für S einen bezeichnenden Namen, so könnte man, ähnlich wie von der Größe U gesagt ist, sie sey der *Wärme- und Werkinhalt* des Körpers, von der Größe S sagen, sie sey der *Verwandlungsinhalt* des Körpers. Da ich es aber für besser halte, die Namen derartiger für die Wissenschaft wichtiger Größen aus den alten Sprachen zu entnehmen, damit sie unverändert in allen neuen Sprachen angewandt werden können, so schlage ich vor, die Größe S nach dem griechischen Worte $\eta \tau\rho\omicron\pi\eta$, die Verwandlung, die *Entropie* des Körpers zu nennen. Das Wort *Entropie* habe ich absichtlich dem Worte *Energie* möglichst ähnlich gebildet, denn die beiden Größen, welche durch diese Worte benannt werden sollen, sind ihren physikalischen Bedeutungen nach einander so nahe verwandt, daß eine gewisse Gleichartigkeit in der Benennung mir zweckmäßig zu seyn scheint.

Fassen wir, bevor wir weiter gehen, der Uebersichtlichkeit wegen noch einmal die verschiedenen im Verlaufe der Abhandlung besprochenen Größen zusammen, welche durch die mechanische Wärmetheorie entweder neu eingeführt sind, oder doch eine veränderte Bedeutung erhalten haben, und welche sich alle darin gleich verhalten, daß sie durch den augenblicklich stattfindenden Zustand des Körpers bestimmt sind, ohne daß man die Art, wie der Körper in denselben gelangt ist, zu kennen braucht, so sind es folgende sechs: 1) der *Wärmeinhalt*, 2) der *Werkinhalt*, 3) die Summe der beiden vorigen, also der *Wärme- und Werkinhalt* oder die *Energie*; 4) der *Verwandlungswert* des *Wärmeinhaltes*, 5) die *Disgregation*, welche als der *Verwandlungswert* der stattfindenden Anordnung der Bestandtheile zu

Die Seite aus dem Artikel, auf der Clausius das Konzept und die Bezeichnung der «Entropie» einführt. Die Gleichung ist die mathematische Definition der Veränderung der Entropie ($S - S_0$) eines Körpers: die Summe (das Integral) der Wärmemengen dQ , die aus dem Körper mit der Temperatur T abgefließen sind.

Clausius' Entropie ist eine messbare und berechenbare Größe,¹⁶ mit dem Buchstaben S bezeichnet, deren Wert wächst oder gleich bleibt, in einem isolierten Prozess aber *niemals geringer wird*. Die zuletzt getroffene Aussage wird ausgedrückt durch die Ungleichung:

$$\Delta S \geq 0$$

Spruch: «Delta S ist immer größer oder gleich null». Dieser sogenannte Zweite Hauptsatz der Thermodynamik (der Erste betrifft die Energieerhaltung) beinhaltet, dass Wärme immer nur von warmen zu kalten Körpern fließt, niemals umgekehrt.

Der Leser möge mir die «Formel» verzeihen: Sie ist die einzige in diesem Fließtext. Weil sie die Formel des Zeitpfeils ist, konnte ich sie in einem Buch über die Zeit nicht weglassen. Als einzige Beziehung in der Grundlagenphysik unterscheidet sie zwischen Vergangenheit und Zukunft. Als die einzige, die uns etwas über das Vergehen von Zeit sagt. In dieser ungewöhnlichen Ungleichung liegt eine Welt verborgen.

Offenbaren sollte sie ein sympathischer Österreicher, Enkel des Gründers einer Spieluhrenfabrik, dessen Leben allerdings ein bitteres Ende fand: Ludwig Boltzmann (1844–1906).

Unschärfe

Ludwig Boltzmann sollte es zufallen, zu erkennen, was sich hinter der Ungleichung $\Delta S \geq 0$ verbirgt. Er sprang dabei in einen schwindelerregenden Abgrund in unserem Verständnis der tief liegenden Struktur der Welt.



Ludwig arbeitete in Graz, Berlin, dreimal in Wien, München und erneut in Graz. Er selbst führte seine Unbeständigkeit – halb im Scherz – darauf zurück, dass er an einem Faschingsdienstag zur Welt gekommen war. Tatsächlich war er von instabilem Charakter, weichherzig hin und her pendelnd zwischen euphorischer Begeisterung und Depression. Klein, kompakt, mit dunklem gelocktem Haar und Rauschebart, wurde er von seiner Verlobten «mein geliebtes Dickerchen» genannt. Ludwig wurde zum tragischen Helden in Sachen Zeitpfeil.

Sadi Carnot hatte Wärme für eine Substanz gehalten und sich getäuscht. Wärme ist die mikroskopische Bewegung der Moleküle. In einem heißen Tee werden die Moleküle heftig zappeln, während sie sich in einem kalten Tee kaum rühren. Und noch weniger bewegen sie sich in einem Eiswürfel, der noch kälter ist.

Noch zu Ende des 19. Jahrhunderts glaubten eher wenige daran, dass Moleküle und Atome tatsächlich existierten. Ludwig war von ihrer Realität überzeugt und focht für sie einen Kampf aus. Seine Angriffe auf diejenigen, die nicht an Atome glaubten, sind legendär geblieben. «Wir, die jungen Mathematiker der damaligen Zeit,

waren alle auf [seiner] Seite [...]», erinnerte sich Jahre später ein junger Pionier der Quantenmechanik.¹⁷ In einer hitzigen Polemik während einer Konferenz in Wien hielt ihm ein bekannter Physiker¹⁸ entgegen, dass der wissenschaftliche Materialismus tot sei, weil die Gesetze der Materie keine Richtung der Zeit kennen: Auch Physiker äußern zuweilen Unfug.

Als Kopernikus einen Sonnenuntergang betrachtete, sah er vor seinem geistigen Auge, wie sich die Erde dreht. Als Boltzmann in ein Glas mit reglosem Wasser blickte, sah er den *wilden Tanz* der Atome und Moleküle.

Wir sehen Wasser in einem Glas wie Astronauten die Erde vom Mond aus: ein stilles blaues Leuchten. Die temperamentvollen Bewegungen des Lebens auf der Erde, die der Pflanzen und Tiere, der Liebe und Verzweiflung sind vom Erdrabanten aus nicht zu erkennen. Sichtbar ist nur eine azurne gesprenkelte Murmel. Entsprechend spielen sich in dem von Licht durchschienenen Wasserglas die stürmischen Aktivitäten von Myriaden von Molekülen ab, von deutlich mehr, als Lebewesen die Erde bevölkern.

Dieses Gewimmel *durchmischt* alles. Wenn ein Teil der Moleküle ruht, wird er vom allgemeinen Trubel mitgerissen und setzt sich seinerseits in Bewegung: Unruhe breitet sich aus. Moleküle prallen zusammen und stoßen aneinander. Deswegen erwärmt sich ein kalter im Kontakt zu einem warmen Körper: Seine Moleküle werden von denen des warmen angestoßen und in Bewegung versetzt. Auf die Art wird er warm.

Die thermische Bewegung ist wie das stetige Mischen eines Stapels Spielkarten: Sind die Karten geordnet, werden sie durch Vermischung durcheinandergebracht. So fließt Wärme vom Warmen zum Kalten ab und nicht umgekehrt: durch Vermischung, dadurch, dass natürlicherweise alles zur Unordnung strebt.

Ludwig Boltzmann erkannte dies. Der Unterschied zwischen Vergangenheit und Zukunft liegt nicht in den elementaren Gesetzen der Bewegung, nicht in der tieferen Struktur der Natur. Vielmehr führt zunehmende Unordnung allmählich zu weniger charakteristischen oder weniger besonderen Zuständen.

Diese Eingebung ist brilliant. Und richtig. Aber erklärt sie den Ursprung des Unterschieds zwischen Vergangenheit und Zukunft? Nein. Sie verschiebt nur das Problem. Jetzt lautet die Frage: Warum waren in einer der beiden Richtungen der Zeit – in der Vergangenheit, wie wir sie nennen – die Dinge geordnet? Warum wies der große Stapel der Spielkarten des Universums in der Vergangenheit eine Ordnung auf? Warum war die Entropie einstmals niedrig?

Wenn wir ein Phänomen betrachten, das in einem Zustand geringer Entropie *beginnt*, ist klar, warum die Entropie zunimmt: weil beim Durchmischen alles in Unordnung gerät. Aber wieso *beginnen* die Phänomene, die wir um uns herum im Kosmos beobachten, in Zuständen niedriger Entropie?

Wir kommen zum entscheidenden Punkt. Wenn die ersten 26 Spielkarten eines Stapels durchweg rot und die nächsten 26 durchweg schwarz sind, reden wir von einer «besonderen» Zusammenstellung des Kartenspiels; es befindet sich in einem «geordneten» Zustand. Diese Ordnung verliert es beim Mischen. Diese Konfiguration von «geringer Entropie» ist besonders mit Blick auf die *Farben* der Karten – rot oder schwarz. Eine andere ist insofern besonders, als die ersten 26 Karten nur aus Herz oder Pik bestehen. Oder aus ungeraden, aus den am stärksten abgegriffenen oder aus genau denselben 26 Karten wie vor drei Tagen ... oder wegen irgendeines anderen Charakteristikums. Beim genaueren Nachdenken *ist jedwede Zusammenstellung speziell*. Je-

de ist einzigartig, wenn ich *alle* Einzelheiten betrachte, weil jede Zusammenstellung etwas hat, das sie auf einzigartige Weise charakterisiert. So wie jedes Kind für seine Mama einzigartig und besonders ist.

Die Vorstellung, dass bestimmte Zusammenstellungen spezieller als andere seien (zum Beispiel 26 rote Karten, gefolgt von 26 schwarzen), ergibt nur dann einen Sinn, wenn ich mich auf die Betrachtung weniger Aspekte der Karten (zum Beispiel die Farbe) beschränke. Wenn ich alle Karten unterscheide, sind alle Zusammenstellungen gleichwertig: Dann gibt es keine mehr oder weniger besonderen.¹⁹ Die Vorstellung von «Besonderheit» ergibt sich erst dann, wenn ich das Universum auf unscharfe, annähernde Weise betrachte.

Boltzmann zeigte, dass die Entropie deshalb existiert, weil wir die Welt ungenau beschreiben, und dass die Entropie eben diejenige Größe ist, die *zählt*, wie viele verschiedene Konfigurationen es gibt, die unsere unscharfe Sichtweise *nicht* unterscheidet. Wärme, Entropie oder geringe Entropie der Vergangenheit sind Begriffe, die zu einer näherungsweisen, statistischen Beschreibung der Natur gehören.

Folglich hängt der Unterschied zwischen Vergangenheit und Zukunft letztlich mit dieser unscharfen Sicht zusammen. Wenn ich sämtliche Details, den genauen Zustand der Welt auf mikroskopischer Ebene berücksichtigen könnte, würden dann die charakteristischen Aspekte des Ablaufs der Zeit verschwinden?

Durchaus. Sobald ich den mikroskopischen Zustand der Dinge betrachte, verschwindet der Unterschied zwischen Vergangenheit und Zukunft. So wird beispielsweise die Zukunft der Welt nicht mehr und nicht weniger als die Vergangenheit vom gegenwärtigen Zustand bestimmt.²⁰ Wir reden häufig davon, dass die Ursachen den Wirkungen vorangehen, aber die elementare Struktur

der Dinge unterscheidet nicht zwischen «Ursache» und «Wirkung».²¹ Es gibt Regelmäßigkeiten, die wir physikalische Gesetze nennen, die Ereignisse zu verschiedenen Zeiten miteinander in Verbindung bringen, symmetrische Regelmäßigkeiten für Zukunft und Vergangenheit ... In der Beschreibung aus mikroskopischer Sicht ist es sinnlos, Vergangenheit von Zukunft zu unterscheiden.³

Dies ist die befremdliche Schlussfolgerung, die sich aus Boltzmanns Forschungen ergibt: Der Unterschied zwischen Vergangenheit und Zukunft bezieht sich auf *unsere* unscharfe Sicht von der Welt. Dieser Schluss macht fassungslos: Ist es möglich, dass meine so eindringliche, grundlegende und existenzielle Wahrnehmung – der Ablauf der Zeit – davon abhängt, dass ich die Welt nicht in den kleinsten Einzelheiten sehe? Als eine Art Täuschung, die meiner Kurzsichtigkeit geschuldet ist? Wenn ich den akkuraten Tanz der Milliarden Moleküle sehen und sie in Betracht ziehen könnte, wäre die Zukunft dann wirklich «wie» die Vergangenheit? Könnte ich dann das gleiche Wissen – oder Unwissen – zur Vergangenheit wie zur Zukunft haben? Zugegeben: Unsere intuitiven Vorstellungen von der Welt gehen häufig in die Irre. Aber kann die Welt so gründlich anders sein, als sie sich in unserer intuitiven Anschauung darstellt?

3 Der Punkt ist nicht, dass die Abläufe in einem kalten Löffel, der in eine Tasse heißen Tee getaucht wird, davon abhängen, ob meine Sichtweise unscharf ist oder nicht. Was mit dem Löffel und seinen Molekülen geschieht, vollzieht sich natürlich unabhängig davon, wie ich sehe. Es geschieht einfach. Der Punkt ist, dass die Beschreibung in Begriffen von Wärme, Temperatur, dem Abfließen der Wärme des Tees in den Löffel eine unscharfe Sicht dessen ist, was geschieht. Und nur in dieser unscharfen Sicht zeigt sich dieser auffällige Unterschied zwischen Vergangenheit und Zukunft.

All dies unterminiert grundlegend unser gewöhnliches Verständnis der Zeit. Es ruft Ungläubigkeit hervor wie einst die Behauptung, dass sich die Erde drehe. Aber hier wie dort ist die Beweislage erdrückend: Alle Phänomene, die den Ablauf der Zeit charakterisieren, reduzieren sich auf einen «besonderen» Zustand in der Vergangenheit der Welt, der eben wegen unserer unscharfen Perspektive «besonders» ist.

Weiter hinten unternehme ich den gewagten Versuch, in das Geheimnis dieser Unschärfe zu blicken, um herauszufinden, wie es mit der seltsamen anfänglichen Unwahrscheinlichkeit des Universums zusammenhängt.

Hier belasse ich es bei der verblüffenden Feststellung, dass die Entropie, wie Boltzmann erkannte, nichts anderes als die Anzahl der mikroskopischen Zustände ist, die unsere unscharfe Sicht von der Welt nicht auseinanderhalten kann.

Die Gleichung, die genau dies besagt²², ist in Boltzmanns Grabstein in Wien eingemeißelt, direkt über der Marmorbüste, die ihn so streng und finster darstellt, wie er meiner Ansicht nach niemals gewesen ist. Nicht wenige Physikstudenten statten seiner Ruhestätte einen Besuch ab und halten nachdenklich vor ihr inne. Manchmal auch ein älterer Professor.

Die Zeit hat ein weiteres entscheidendes Stück verloren: den vertrauten Unterschied zwischen Vergangenheit und Zukunft. Boltzmann hat erkannt, dass im Ablauf der Zeit nichts Substanzielles liegt. Nur der unscharfe Reflex einer mysteriösen Unwahrscheinlichkeit des Universums an einem Punkt in der Vergangenheit.

Dies allein ist die Quelle der *ewigen Strömung* aus Rilkes Elegie.

Mit nur fünfundzwanzig Jahren zum Universitätsprofessor berufen, zum Zeitpunkt seines größten Erfolges vom Kaiser empfangen, von einem Großteil der akademi-

schen Welt, der sein Denken nicht verstand, heftig kritisiert und selbst stets zwischen Euphorie und Depression hin und her gerissen, setzte das «geliebte Dickerchen» seinem Leben mit einem Strick ein Ende.

Es geschah in Duino bei Triest, während seine Frau und seine Tochter zum Baden ans Adriatische Meer gegangen waren. In ebendiesem Duino sollte wenige Jahre später Rilke seine Elegie verfassen.

[...]

Endnoten

- 1 Aristoteles, *Metaphysik*, I, 2, 982 b.
- 2 Eine eingehende Erörterung zur Schichtung des Zeitbegriffs leistet zum Beispiel J. T. Fraser, *Of Time, Passion, and Knowledge*, New York 1975.
- 3 Der Philosoph Mauro Dorato hat die Notwendigkeit hervorgehoben, den elementaren konzeptionellen Rahmen der Physik ausdrücklich unserer Erfahrung anzupassen. Siehe hierzu *Che cos'è il tempo?*, Rom 2013.
- 4 So der Kern der Allgemeinen Relativitätstheorie, siehe hierzu A. Einstein, «Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie», in: *Annalen der Physik* 49 (1916), S. 769–822.
- 5 In der Näherung des schwachen Feldes (Newton'sche Näherung) ist die Metrik darstellbar als $ds^2 = (1 + 2\Phi(x)) dt^2 - dx^2$, wobei $\Phi(x)$ das Newton'sche Potenzial ist. Die Newton'sche Gravitation folgt aus der einfachen Modifikation der Zeitkomponente der Metrik, g_{00} , also aus der lokalen Verlangsamung der Zeit. Die geodätischen Linien dieser Metrik beschreiben das Herabfallen der Körper: Sie krümmen sich zum tieferliegenden Potenzial, wo sich die Zeit verlangsamt. (Diese und ähnliche Anmerkungen sind für Leser gedacht, die mit theoretischer Physik vertraut sind.)
- 6 «But the fool on the hill / sees the sun going down, / and the eyes in his head / see the world spinning 'round ...»
- 7 C. Rovelli, *Che cos'è la scienza. La rivoluzione di Anassimandro*, Mailand 2011.
- 8 Zum Beispiel: $t_{\text{auf dem Tisch}} - t_{\text{am Boden}} = 2gh/c^2 t_{\text{am Boden}}$, wobei c die Lichtgeschwindigkeit, $g = 9,8 \text{ m/s}^2$ die Erdbeschleunigung Galileos und h die Höhe des Tisches ist.

9 Sie lassen sich auch mit einer einzigen Variablen t , der «Zeitkoordinate» darstellen, die aber nicht die von einer Uhr gemessene Zeit (bestimmt durch ds , nicht durch dt) angibt und die man willkürlich austauschen kann, ohne die beschriebene Welt zu verändern. Dieses t stellt keine physikalische Größe dar. Was die Uhren messen, ist die Zeit eben entlang einer Weltlinie γ , gegeben durch $t_\gamma = \int_\gamma (g_{ab}(x)dx^a dx^b)^{1/2}$. Zur physikalischen Beziehung zwischen dieser Größe und $g_{ab}(x)$ siehe die Erörterung weiter hinten.

10 Rainer Maria Rilke, *Duineser Elegien*, in: *Sämtliche Werke*, Bd. 1, Frankfurt a. M. 1955, I, Verse 83 ff., siehe auch unter <http://gutenberg.spiegel.de/buch/duineser-elegien-829/1>.

11 Tatsächlich war die Zeit der Französischen Revolution auch eine besonders fruchtbare Ära der Wissenschaft, in der die Grundlagen der Chemie, der Biologie, der analytischen Mechanik und zahlreicher weiterer Disziplinen gelegt wurden. Die gesellschaftliche ging mit der wissenschaftlichen Revolution Hand in Hand: Jean-Sylvain Bailly, der erste Pariser Bürgermeister der Revolutionszeit, war Astronom. Lazare Carnot war Mathematiker. Und Jean Paul Marat betrachtete sich vor allem als Physiker. Der Chemiker Lavoisier engagierte sich politisch. Der Mathematiker und Astronom Joseph-Louis de Lagrange wurde von den unterschiedlichsten Regierungen ausgezeichnet, die in dieser ebenso tragischen wie glanzvollen Zeit der Menschheitsgeschichte aufeinanderfolgten. Siehe hierzu S. Jones, *Revolutionary Science: Transformation and Turmoil in the Age of the Guillotine*, New York 2017.

12 Sie verändern sich gegebenenfalls: zum Beispiel das Vorzeichen für das Magnetfeld in den Maxwell-Gleichungen, Ladung und Parität der Elementar-

teilchen usw. Wichtig ist die sogenannte CPT-Invarianz (CPT für Ladung, Parität und Zeit).

13 Newtons Gleichungen beschreiben die *beschleunigte* Bewegung von Objekten. Die Beschleunigung verändert sich nicht, wenn ein Film rückwärts abläuft: Die Beschleunigung eines in die Höhe geworfenen Steins ist dieselbe wie bei der eines herabfallenden:

Wenn ich mir den Verlauf der Jahre im Rückwärtsgang vorstelle, läuft der Mond in Gegenrichtung um die Erde, erscheint von ihr aber gleichermaßen angezogen.

14 Die Schlussfolgerung bleibt dieselbe, wenn die Quantengravitation berücksichtigt wird. Zu Bemühungen, dem Ursprung der Richtung der Zeit auf die Spur zu kommen, siehe zum Beispiel H. D. Zeh, *Die Physik der Zeitrichtung*, Berlin 1984.

15 R. Clausius, «Über verschiedene für die Anwendung bequeme Formen der Hauptgleichungen der mechanischen Wärmetheorie», in: *Annalen der Physik* 125 (1865), S. 353–400, hier S. 390.

16 Insbesondere als Wärmemenge, die aus dem Körper abfließt, *geteilt durch die Temperatur*. Wenn Wärme aus einem wärmeren Körper in einen kälteren übergeht, wächst die Gesamtentropie: Der Temperaturunterschied sorgt dafür, dass die Entropie, die der abfließenden Wärme geschuldet ist, geringer als die der zufließenden Wärme geschuldeten ist. Haben alle Körper dieselbe Temperatur erreicht, ist die Entropie am größten: Das Gleichgewicht ist erreicht.

17 Arnold Sommerfeld (1868–1951).

18 Hans Christian Ørsted (1777–1851).

19 Die Definition der Entropie erfordert *Coarse Graining*, also die Unterscheidung zwischen Mikro- und Makrozuständen. Die Entropie eines Makrozustands wird von der Anzahl der entsprechenden Mikrozustände bestimmt. In der klassischen Thermodynamik ist *Co-*

arse Graining in dem Moment definiert, in dem man festlegt, einige Variablen des Systems (zum Beispiel Volumen oder Druck eines Gases) als von außen «manipulierbar» oder «messbar» zu behandeln. Ein Makrozustand wird durch Festsetzung *dieser* makroskopischen Variablen bestimmt.

20 Also auf deterministische Weise, wenn man die Quantenmechanik vernachlässigt, und probabilistisch, wenn wir sie in Betracht ziehen. In beiden Fällen auf gleiche Weise für die Zukunft und für die Vergangenheit.

21 Weiteres hierzu siehe Kapitel 11.

22 $S = k \log W$. S ist die Entropie, W die Anzahl der mikroskopischen Zustände oder das entsprechende Volumen im Phasenraum und k die heute sogenannte Boltzmann-Konstante, welche die (willkürlichen) Einheiten festlegt.