

P

SABINE
HOSSENFELDER

MEHR ALS NUR ATOME

Was die Physik über die Welt
und das Leben verrät

*Aus dem Englischen
von Monika Niehaus und Bernd Schuh*

Pantheon

Die Originalausgabe erschien 2022 unter dem Titel
Existential Physics: A Scientist's Guide to Life's Biggest Questions
bei Viking, New York.

Der Verlag behält sich die Verwertung der urheberrechtlich
geschützten Inhalte dieses Werkes für Zwecke des Text- und
Data-Minings nach § 44 b UrhG ausdrücklich vor.
Jegliche unbefugte Nutzung ist hiermit ausgeschlossen.

Den Auszug aus »Galaxy Formation Efficiency and the Multiverse Explanation
of the Cosmological Constant with EAGLE Simulations« von Luke A. Barnes
et al. in den *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 477, Nr. 3
(Januar 2018), drucken wir mit freundlicher Genehmigung von Luke A. Barnes
und Oxford University Press.

Sämtliche Abbildungen © Sabine Hossenfelder



Penguin Random House Verlagsgruppe FSC® N001967

1. Auflage
Copyright © 2024 by Pantheon Verlag
in der Penguin Random House Verlagsgruppe GmbH,
Neumarkter Straße 28, 81673 München
Copyright der Originalausgabe © 2022 by Sabine Hossenfelder
Copyright der deutschsprachigen Ausgabe © 2023 by Siedler Verlag, München
Umschlaggestaltung: Büro Jorge Schmidt, München
Umschlagabbildung: © Shutterstock/Lonvero
Satz: Leingärtner, Nabburg
Druck und Bindung: GGP Media GmbH, Pößneck
Printed in Germany
ISBN 978-3-570-55500-2

www.pantheon-verlag.de

Für Stefan

Es ist weitaus besser, das Universum so zu begreifen,
wie es wirklich ist, als in Täuschungen zu verharren,
so befriedigend und beruhigend sie auch sein mögen.¹

Carl Sagan

INHALT

VORWORT

13

EINE WARNUNG

19

KAPITEL 1

EXISTIERT DIE VERGANGENHEIT IM JETZT?

21

KAPITEL 2

WIE IST DAS UNIVERSUM ENTSTANDEN?

WIE WIRD ES ENDEN?

47

ANDERE STIMMEN #1

IST MATHEMATIK ALLES?

71

KAPITEL 3

WARUM WIRD NIEMALS JEMAND JÜNGER?

79

KAPITEL 4

SIND WIR NICHT MEHR ALS EIN HAUFEN ATOME?

113

ANDERE STIMMEN #2

IST WISSEN VORHERSAGBAR?

133

KAPITEL 5

GIBT ES KOPIEN VON UNS?

143

KAPITEL 6

**HAT DIE PHYSIK DEN FREIEN WILLEN
UNMÖGLICH GEMACHT?**

167

ANDERE STIMMEN #3

IST BEWUSSTSEIN BERECHENBAR?

187

KAPITEL 7

WURDE DAS UNIVERSUM FÜR UNS GESCHAFFEN?

195

KAPITEL 8

DENKT DAS UNIVERSUM?

217

ANDERE STIMMEN #4

KÖNNEN WIR EIN UNIVERSUM ERSCHAFFEN?

243

KAPITEL 9
IST MENSCHLICHES VERHALTEN VORHERSAGBAR?
251

NACHWORT
WAS IST EIGENTLICH DER SINN VON ALLEM?
273

DANK
283

WICHTIGE FACHBEGRIFFE
285

ANMERKUNGEN
291

REGISTER
309

VORWORT

Darf ich Sie etwas fragen?«, erkundigte sich ein junger Mann, nachdem er erfahren hatte, dass ich Physikerin bin. »Es geht um Quantenmechanik«, fügte er schüchtern hinzu. Ich war durchaus bereit, über das Grundpostulat der Quantenmechanik zu debattieren und die Fallstricke der Quantenverschränkung zu diskutieren, aber auf das, was folgte, war ich nicht vorbereitet: »Ein Schamane hat mir gesagt, dass meine Großmutter noch lebt. Wegen der Quantenmechanik. Sie lebt nur nicht hier und jetzt. Stimmt das?«

Wie Sie sehen, denke ich noch immer darüber nach. Die kurze Antwort lautet: Die Aussage ist nicht völlig falsch. Die lange Antwort folgt in Kapitel 1, aber bevor ich zur Quantenmechanik verstorbener Großmütter komme, möchte ich Ihnen erklären, warum ich dieses Buch schreibe.

In mehr als einem Jahrzehnt Öffentlichkeitsarbeit habe ich festgestellt, dass Physiker sehr gut darin sind, Fragen zu beantworten, aber nicht wirklich gut erklären können, warum sich irgendjemand um ihre Antworten scheren sollte. In manchen Forschungsgebieten offenbart sich der Zweck einer Untersuchung schließlich in einem vermarktbaren Produkt von selbst. In der Grundlagenphysik – die den Schwerpunkt meiner Forschung bildet – ist das Hauptprodukt Wissen. Und nur allzu oft präsentieren meine Kollegen und ich dieses Wissen auf so abstrakte Weise, dass niemand

versteht, warum wir uns überhaupt die Mühe gemacht haben, danach zu suchen.

Nicht, dass dies allein ein Problem der Physik wäre. Die Trennung zwischen Experten und Nichtexperten ist so weit verbreitet, dass der Soziologe Steve Fuller behauptet, Akademikerinnen und Akademiker bedienen sich bewusst einer unverständlichen Terminologie, um Einsichten möglichst knapp zu halten und sie dadurch wertvoller zu machen. Wie der amerikanische Journalist und Pulitzer-Preisträger Nicholas Kristof klagte, verschlüsseln Akademiker »Erkenntnisse in schwülstiger Prosa«, und »als doppelter Schutz gegen öffentlichen Konsum wird dieses Fachchinesisch dann manchmal auch noch in obskuren Zeitschriften versteckt«.²

Typisches Beispiel: Normale Menschen interessieren sich nicht besonders dafür, ob die Quantenmechanik vorhersagbar ist, sie wollen wissen, ob ihr eigenes Verhalten vorhersagbar ist. Es kümmert sie nicht besonders, ob Schwarze Löcher Information zerstören, sie wollen wissen, was mit der gesammelten Information der menschlichen Zivilisation geschieht. Es interessiert sie nicht besonders, ob galaktische Filamente neuronalen Netzwerken ähneln; sie wollen wissen, ob das Universum denken kann. Normale Menschen sind eben normale Menschen. Wer hätte das gedacht?

Natürlich will ich all diese Dinge ebenfalls wissen. Aber irgendwo auf meinem Weg durch die akademischen Institutionen habe ich gelernt, solche Fragen zu vermeiden, geschweige denn, sie zu beantworten. Schließlich bin ich nur eine Physikerin. Ich besitze nicht die Kompetenz, um über Bewusstsein und menschliches Verhalten oder Ähnliches zu sprechen.

Dennoch machte mir die Frage des jungen Mannes klar, dass die Physik *tatsächlich* einige Dinge weiß, wenn auch nicht über das Bewusstsein selbst, dann doch über die physikalischen Gesetze, die alles im Universum – einschließlich Ihnen und mir und Ihrer Großmutter – einhalten muss. Nicht alle Vorstellungen über Leben und

Tod und den Ursprung der menschlichen Existenz sind mit den Grundlagen der Physik vereinbar. Das ist Wissen, das wir nicht unter einem Schwall unverständlicher Prosa in obskuren Fachzeitschriften verstecken sollten.

Nicht nur, dass dieses Wissen es wert ist, geteilt zu werden – es für uns zu behalten, hat Konsequenzen. Wenn Physiker nicht vortreten und erklären, was die Physik über das menschliche Leben zu sagen hat, werden andere die Gelegenheit ergreifen und unsere kryptische Terminologie zur Förderung von Pseudowissenschaften missbrauchen. Es ist kein Zufall, dass Quantenverschränkung und Vakuumenergie wohlfeile Erklärungen alternativer Heiler, Spiritistinnen und Quacksalber sind. Wenn Sie keinen Dokortitel in Physik haben, ist es schwierig, *unser* Fachchinesisch von dem anderer zu unterscheiden.

Doch ich habe hier mehr vor, als Pseudowissenschaften als das zu entlarven, was sie sind. Ich möchte auch vermitteln, dass einige spirituelle Ideen völlig kompatibel mit der modernen Physik sind und andere sogar von ihr gestützt werden. Und warum auch nicht? Dass die Physik etwas zu unserer Verbindung mit dem Universum zu sagen hat, sollte uns nicht überraschen. Wissenschaft und Religion haben dieselben Wurzeln, und auch heute noch beschäftigen sie sich mit einigen der gleichen Fragen: Woher kommen wir? Wohin gehen wir? Wie viel Wissen können wir erwerben?

Was diese Fragen betrifft, so haben Physiker im letzten Jahrhundert eine Menge gelernt. Ihr Fortschritt macht deutlich, dass die Grenzen der Naturwissenschaften nicht festliegen; sie verschieben sich, während wir mehr über die Welt herausfinden. Im Gegenzug wissen wir inzwischen, dass einige auf Glauben beruhende Erklärungen, die uns einst halfen, unserer Existenz einen Sinn zu verleihen und uns Trost zu spenden, einfach falsch waren. Die Vorstellung, beispielsweise, dass gewisse Objekte lebendig sind, weil sie mit einer speziellen Substanz (Henri Bergsons »Élan vital«) ausgestattet

sind, war vor zweihundert Jahren durchaus mit dem Stand des Wissens vereinbar. Heute ist sie es nicht mehr.

In der heutigen Grundlagenphysik beschäftigen wir uns mit den Naturgesetzen, die auf der fundamentalsten Ebene operieren. Auch hier ersetzen die Erkenntnisse, die wir in den letzten hundert Jahren gewonnen haben, alte, auf Glauben beruhende Erklärungen. Eine dieser alten Erklärungen ist die Vorstellung, dass Bewusstsein mehr erfordert als die Wechselwirkung vieler Teilchen, nämlich letztlich eine Art magischen Feenstaub, der gewisse Objekte mit speziellen Eigenschaften ausstattet. Wie der *Élan vital* ist dies eine überholte und wenig hilfreiche Vorstellung, die nichts erklärt. Ich werde darauf in Kapitel 4 zurückkommen, und in Kapitel 6 werde ich die Konsequenzen diskutieren, die dies für den freien Willen hat. Eine weitere Vorstellung der Kategorie »Reif für die Mottenkiste« ist die Überzeugung, dass unser Universum für das Hervorbringen von Leben besonders geeignet sei; das ist der Schwerpunkt von Kapitel 7.

Die gegenwärtigen Grenzen der Naturwissenschaften aufzuzeigen, zerstört jedoch nicht nur Illusionen, sondern hilft uns auch zu erkennen, welche Überzeugungen noch mit wissenschaftlichen Fakten in Einklang stehen.

Solche Überzeugungen sollten vielleicht nicht als *unwissenschaftlich*, sondern als *außerwissenschaftlich* bezeichnet werden, wie Tim Palmer (dem wir später noch begegnen werden) so treffend bemerkt: Die Wissenschaft sagt nichts über sie. Eine solche Überzeugung betrifft den Ursprung unseres Universums. Diesen Ursprung können wir gegenwärtig nicht erklären, und es ist fraglich, ob wir ihn jemals werden erklären können. Möglicherweise stoßen die Naturwissenschaften in dieser Hinsicht an eine fundamentale Grenze. Zumindest ist das meine gegenwärtige Überzeugung. Die Vorstellung, dass das Universum selbst über Bewusstsein verfügt, lässt sich, wie ich zu meinem eigenen Erstaunen festgestellt habe,

nur schwer völlig ausschließen (Kapitel 8). Und über die Frage, ob menschliches Verhalten vorhersagbar ist oder nicht, ist das letzte Wort noch nicht gesprochen (Kapitel 9).

Kurz gesagt, ist dies ein Buch über die großen Fragen, die die moderne Physik aufwirft, von der Frage, ob sich der gegenwärtige Moment von der Vergangenheit unterscheidet, über die Vorstellung, dass jedes Elementarteilchen möglicherweise ein ganzes Universum enthält, bis zu der Sorge, dass die Naturgesetze unsere Entscheidungen festlegen. Natürlich kann ich keine endgültigen Antworten geben. Ich möchte Ihnen jedoch sagen, wie viel Naturwissenschaftlerinnen und Naturwissenschaftler gegenwärtig wissen, und auch deutlich machen, wo Wissenschaft in reine Spekulation übergeht.

Größtenteils werde ich mich an die etablierten naturwissenschaftlichen Theorien halten, die von Beobachtungen und Experimenten gestützt werden. Alles, was ich im Folgenden sagen werde, steht daher unter dem Vorbehalt »soweit wir heute wissen«, das heißt, zukünftige wissenschaftliche Fortschritte könnten zu einer Korrektur führen. In einigen Fällen hängt die Antwort auf eine Frage von Eigenschaften der Naturgesetze ab, die wir noch nicht völlig verstehen, wie dem quantenmechanischen Messprozess oder der Natur von Raumzeit-Singularitäten. In diesem Fall werde ich aufzeigen, wie die zukünftige Forschung zur Beantwortung der Frage beitragen könnte. Und weil ich nicht möchte, dass Sie nur meine Meinung hören, habe ich ein paar Interviews eingefügt. Zudem finden Sie am Ende des Buches ein kurzes Verzeichnis mit Definitionen der wichtigsten Fachbegriffe. Begriffe, die dort erklärt werden, sind bei der ersten Erwähnung im Text fett gedruckt.

Mehr als nur Atome ist für die Menschen gedacht, die auch heute noch die großen Fragen stellen und die keine Angst vor den Antworten haben.

EINE WARNUNG

Ich möchte, dass Sie wissen, worauf Sie sich einlassen, also lassen Sie mich meine Karten offenlegen. Ich bin sowohl Agnostikerin als auch Heidin. Ich war niemals Teil einer organisierten Religion und habe auch niemals den Wunsch dazu verspürt. Dennoch bin ich keine Gegnerin religiöser Überzeugungen. Die Naturwissenschaften haben ihre Grenzen, und die Menschheit hat schon immer nach einem Sinn jenseits dieser Grenzen gesucht. Einige tun dies, indem sie heilige Schriften studieren, andere meditieren, wieder andere beschäftigen sich mit Philosophie, und noch andere rauchen seltsame Sachen. Das ist für mich alles in Ordnung, wirklich. Vorausgesetzt – und das ist der entscheidende Punkt –, Ihre Sinnsuche respektiert wissenschaftliche Fakten.

Wenn Ihre Überzeugungen mit empirisch belegtem Wissen im Widerstreit stehen, dann suchen Sie nicht nach Sinn, sondern wiegen sich in einem Wahn. Vielleicht möchten Sie lieber an Ihrem Wahn festhalten. Das kann ich durchaus verstehen, glauben Sie mir – aber dann ist dieses Buch nichts für Sie. In den kommenden Kapiteln werden wir über freien Willen, das Leben nach dem Tod und die ultimative Suche nach Sinn sprechen. Das wird nicht immer einfach sein. Ich selbst habe mit einigen der Konsequenzen, die sich aus nachweislich gut belegten Naturgesetzen ergeben, zu kämpfen gehabt, und ich vermute, dass es einigen von Ihnen ebenso ergehen wird.

Vielleicht denken Sie, ich übertreibe jetzt, um trockene Physik aufregender klingen zu lassen. Na klar, wir alle wissen, dass ich diesem Buch gute Verkaufszahlen wünsche, also warum etwas anderes vorgeben? Der Hauptgrund für diese Warnung ist jedoch, dass ich mich wirklich Sorge, dieses Buch könnte die geistige Gesundheit mancher Leser negativ beeinflussen. Gelegentlich schreibt mir jemand, er sei auf einen meiner Aufsätze gestoßen und wisse nun nicht mehr, wie es in seinem Leben weitergehen solle. Diese Menschen scheinen wirklich verstört. Welchen Sinn hat das Leben ohne freien Willen? Was bedeutet die menschliche Existenz, wenn es sich nur um einen zufälligen Glückstreffer handelt? Wie soll man nicht verrückt werden, wenn man weiß, dass das Universum jeden Moment erlöschen kann?

Einige wissenschaftliche Fakten sind tatsächlich schwer zu verdauen, und, schlimmer noch, es gibt keinen Psychologen, der da weiterhelfen könnte. Ich weiß es, weil ich es versucht habe. Aber halten Sie durch. Wenn man es durchdenkt, gibt uns die Wissenschaft mehr, als sie nimmt. Am Ende, so hoffe ich jedenfalls, werden Sie Trost in dem Wissen finden, dass Sie Ihr rationales Denken nicht ausschalten müssen, um Hoffnung, Überzeugung und Glauben Raum zu geben.

KAPITEL 1

EXISTIERT DIE VERGANGENHEIT IM JETZT?

JETZT UND NIE

Zeit ist Geld. Und sie wird knapp. Es sei denn, sie ist auf Ihrer Seite. Die Zeit fliegt. Die Zeit ist um. Wir reden die ganze Zeit ... über Zeit. Und dennoch bleibt die Zeit eine der am schwierigsten zu fassenden Eigenschaften der Natur.

Es half nicht, dass Albert Einstein die Zeit zu etwas Persönlichem machte. Vor Einstein verging jedermanns Zeit gleich schnell. Wir in der Nach-Einstein-Ära wissen hingegen, dass der Ablauf der Zeit davon abhängt, wie sehr wir uns bewegen. Und während der Zahlenwert, den wir jedem Moment zuordnen – beispielsweise 14:14 Uhr –, eine Frage der Konvention und der Messgenauigkeit ist, glaubten wir vor Einstein, *Ihr* Jetzt sei dasselbe wie *mein* Jetzt; es war ein universelles Jetzt, das kosmische Ticken einer unsichtbaren Uhr, das den gegenwärtigen Moment als etwas Spezielles kennzeichnete. Seit Einstein ist *jetzt* nicht mehr als ein bequemer Begriff, den wir benutzen, um unsere Erfahrung zu beschreiben. Der gegenwärtige Moment ist nicht länger von grundlegender Bedeutung, denn wie Einstein gezeigt hat, sind Vergangenheit und Zukunft genauso real wie die Gegenwart.

Das entspricht nicht meiner Erfahrung und der Ihren wahrscheinlich auch nicht. Die menschliche Erfahrung ist jedoch keine gute Richtschnur, wenn es um die fundamentalen Gesetze der Natur geht. Unsere Zeitwahrnehmung wird von zirkadianen Rhythmen und der Fähigkeit unseres Gehirns bestimmt, Erinnerungen zu speichern und wieder abzurufen. Diese Fähigkeit ist zweifellos für viele Dinge nützlich, doch um die Physik der Zeit von der Zeitwahrnehmung zu trennen, ist es besser, sich einfache Systeme wie schwingende Pendel, auf ihrer Umlaufbahn kreisende Planeten oder das Licht anzuschauen, das uns von fernen Sternen erreicht. Aus der Beobachtung solch simpler Systeme können wir die Natur der Zeit zuverlässig ableiten, ohne in der oft ungenauen Deutung stecken zu bleiben, mit der unsere Sinne die Physik ausschmücken.

Hundert Jahre Beobachtung haben bestätigt, dass Zeit die Eigenschaften aufweist, die Einstein zu Beginn des 20. Jahrhunderts vermutete. Einstein zufolge ist Zeit eine Dimension und bildet gemeinsam mit den drei Dimensionen des Raumes eine Einheit: die Raumzeit. Die Idee, Raum und Zeit zu einer Raumzeit zusammenzufügen, geht auf den Mathematiker Hermann Minkowski zurück, doch Einstein war es, der die vollen physikalischen Konsequenzen erkannte und in seiner Speziellen Relativitätstheorie zusammenfasste.

Der Begriff *Relativität* in der *Speziellen Relativitätstheorie* meint, dass es kein absolutes Ruhesystem gibt; man kann nur relativ zu etwas stillstehen. Beispielsweise befinden Sie sich wahrscheinlich gerade relativ zu diesem Buch in Ruhe; es bewegt sich weder von Ihnen weg noch auf Sie zu. Wenn Sie es jedoch in die Ecke werfen, gibt es zwei Möglichkeiten, die Situation zu beschreiben: Das Buch bewegt sich mit einer gewissen Geschwindigkeit relativ zu Ihnen und dem Rest des Planeten Erde, oder Sie und der Rest der Erde bewegen sich relativ zum Buch. Einstein zufolge sind das zwei äquivalente Möglichkeiten, die Physik zu beschreiben, die zu derselben Vorhersage führen sollten – dafür steht der Begriff *Relativität*. Das *speziell*

bedeutet lediglich, dass die Theorie die Gravitation nicht einschließt. Die Gravitation kam erst später hinzu, in Einsteins **Allgemeiner Relativitätstheorie**.

Die Idee, dass wir in der Lage sein sollten, physikalische Phänomene auf dieselbe Weise zu beschreiben, ganz gleich, wie wir uns in Einsteins vierdimensionaler Raumzeit bewegen, erscheint ziemlich unverfänglich, doch sie hat unser Konzept von Zeit völlig verändert.



In unserem gewöhnlichen dreidimensionalen Raum können wir mithilfe von drei Zahlen jedem Ort Koordinaten zuordnen. Wir könnten zum Beispiel die Entfernung zu Ihrer Wohnungstür in Richtung Ost-West, Nord-Süd und oben-unten benutzen. Falls Zeit eine Dimension ist, fügen wir lediglich eine vierte Koordinate hinzu, sagen wir, die Zeit, die seit 7:00 Uhr an Ihrer Eingangstür vergangen ist. Die vollständigen Koordinaten nennen wir dann ein *Ereignis*. Zum Beispiel: Das Raumzeitereignis bei 3 Meter östlich, 12 Meter nördlich, 3 Meter nach oben und 10 Stunden wäre dann Ihr Balkon um 17:00 Uhr.

Diese Koordinatenwahl ist willkürlich. Es gibt viele verschiedene Möglichkeiten, die Raumzeit mit Koordinaten zu versehen, und nach Einsteins Ansicht sollten die Bezeichnungen keine Rolle spielen. Die Zeit, die tatsächlich für ein Objekt vergeht, kann nicht von den gewählten Koordinaten abhängen. Und er zeigte, dass diese invariante, interne Zeit – die *Eigenzeit*, wie Physiker sie nennen – der Länge einer Kurve in der Raumzeit entspricht.

Stellen Sie sich vor, Sie reisen mit dem Auto von Los Angeles nach Toronto. Was für Sie zählt, ist nicht die kürzeste Entfernung (Luftlinie) zwischen diesen beiden Punkten, rund 3500 Kilometer, sondern die Entfernung längs Autobahnen und Landstraßen, die eher 4000 Kilometer beträgt. Wichtig ist die Länge der Reise, nicht die

Entfernung zwischen den Koordinaten. Es gibt jedoch einen wichtigen Unterschied, denn in der Raumzeit gilt: Je länger die Kurve zwischen zwei Ereignissen, desto *weniger* Zeit vergeht auf ihr.

Wie verlängert man eine Kurve zwischen zwei Raumzeit-Ereignissen? Indem man seine Geschwindigkeit verändert. Je stärker Sie beschleunigen, desto langsamer vergeht Ihre Eigenzeit. Diesen Effekt nennt man *Zeitdehnung* oder *Zeitdilatation*. Und ja, das bedeutet tatsächlich, dass man langsamer altert, wenn man immer im Kreis läuft.³ Doch dieser Effekt ist winzig, und ich kann das Verfahren nicht als Anti-Aging-Strategie empfehlen. Nebenbei gesagt, ist das auch der Grund, warum die Zeit in der Nähe eines Schwarzen Lochs langsamer vergeht als in weiterer Entfernung davon. Das ist so, weil ein starkes Gravitationsfeld in Einklang mit Einsteins Äquivalenzprinzip denselben Effekt hat wie eine hohe Beschleunigung.

Was bedeutet das? Stellen Sie sich vor, ich hätte zwei identische Uhren und gäbe Ihnen eine davon; dann gingen Sie Ihrer Wege und ich meiner. In der Prä-Einstein-Ära hätten wir angenommen, dass unsere Uhren, wann immer wir uns trafen, genau dieselbe Zeit anzeigen würden – das wäre der Fall, wenn Zeit ein universeller Parameter wäre. Aber seit Einstein wissen wir, dass das nicht stimmt. Wie viel Zeit auf Ihrer Uhr vergeht, hängt davon ab, wie viel und wie schnell Sie sich bewegen.

Woher wissen wir, dass das tatsächlich so ist? Nun, wir können es messen. Es würde uns zu weit vom Thema wegführen, im Detail zu erklären, welche Beobachtungen Einsteins Theorien bestätigt haben, doch ich werde Ihnen in den Anmerkungen Hinweise auf weiterführende Literatur geben.⁴ Damit wir weiterkommen, lassen Sie mich lediglich zusammenfassend sagen: Die Hypothese, dass das Vergehen der Zeit davon abhängt, wie man sich bewegt, wird von einer Fülle solider Beweise gestützt.

Ich habe zur Illustration von Uhren gesprochen, doch die Tatsache, dass Beschleunigung die Zeit verlangsamt, hat nichts speziell

mit den Geräten zu tun, die wir Uhren nennen; sie gilt für jedes beliebige Objekt. Ob es sich um Verbrennungszyklen, nuklearen Zerfall, das Rinnen von Sand in einem Stundenglas oder Herzschläge handelt, jeder Prozess hat seinen eigenen Zeitverlauf. Die Unterschiede zwischen individuellen Zeiten sind jedoch in der Regel winzig, darum bemerken wir sie im Alltag auch nicht. Sie werden aber deutlich, wenn wir die Zeit sehr präzise messen, wie beispielsweise in Satelliten, die Teil des Globalen Positionsbestimmungssystems (GPS) sind.

Das GPS, das Ihr Smartphone höchstwahrscheinlich als Navigationssystem benutzt, erlaubt einem Empfänger – wie Ihrem Handy –, seine Position mithilfe von Signalen mehrerer Satelliten zu berechnen, die die Erde umkreisen. Da Zeit nicht universell ist, vergeht sie auf diesen Satelliten ein klein wenig anders als auf der Erde; das liegt an der Bewegung der Satelliten relativ zur Erdoberfläche und an dem schwächeren Gravitationsfeld, dem die Satelliten auf ihrer Umlaufbahn ausgesetzt sind. Die Software Ihres Handys muss dies berücksichtigen, um dessen Position korrekt zu bestimmen, denn das etwas andere Vergehen der Zeit auf den Satelliten verzerrt die Signale um einen winzigen Betrag. Der Effekt ist wirklich klein, aber keine philosophische Haarspalterei; er ist physikalisch real.



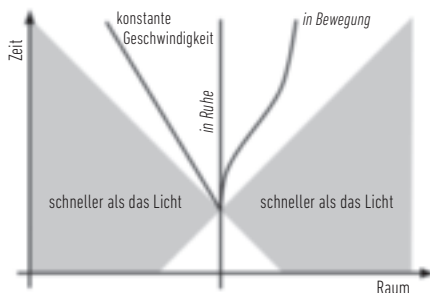
Dass die Zeit nicht überall gleich schnell vergeht, ist schon an sich ziemlich verblüffend, aber es kommt noch besser. Da die Lichtgeschwindigkeit sehr hoch, aber endlich ist, braucht das Licht Zeit, um uns zu erreichen; das heißt, wir sehen die Dinge streng genommen so, wie sie etwas früher aussahen. Aber auch das nehmen wir im Alltag normalerweise nicht wahr. Licht bewegt sich so schnell, dass dies für die kurzen Distanzen auf der Erde keine Rolle spielt. Wenn man zum Beispiel zum Himmel blickt und sich die Wolken anschaut,

sieht man die Wolken tatsächlich so, wie sie eine Millionstel Sekunde zuvor aussahen. Das macht keinen großen Unterschied, oder? Wir sehen die Sonne so, wie sie vor acht Minuten aussah, doch da sich die Sonne innerhalb weniger Minuten normalerweise nicht stark verändert, spielt es keine Rolle, wie lange das Licht bis zu uns braucht. Wenn man zum Polarstern aufschaut, sieht man ihn so, wie er vor 434 Jahren aussah. Nun gut, sagen Sie vielleicht, was soll's?

Es ist verlockend, diese Verzögerung zwischen dem Moment, an dem etwas passiert, und unserer Beobachtung unserer beschränkten Wahrnehmung zuzuschreiben, doch diese Verzögerung hat weitreichende Konsequenzen. Erneut geht es darum, dass das Vergehen der Zeit nicht universell ist. Wenn man fragt, was »zur selben Zeit« anderswo geschah – beispielsweise, was genau Sie taten, als die Sonne das Licht emittierte, das Sie jetzt sehen –, dann lässt sich diese Frage nicht sinnvoll beantworten.

Dieses Problem ist als die *Relativität der Gleichzeitigkeit* bekannt und wurde von Einstein selbst gut veranschaulicht. Um zu sehen, wie diese Relativität zustande kommt, ist es hilfreich, ein paar Zeichnungen der Raumzeit anzufertigen. Es ist schwierig, vier Dimensionen zu zeichnen, daher werden Sie mir hoffentlich verzeihen, wenn ich nur eine Dimension für den Raum und eine Dimension für die Zeit verwende. Ein Objekt, das sich relativ zum gewählten Koordinatensystem nicht bewegt, wird in diesem Diagramm als senkrechte gerade Linie beschrieben (Abbildung 1). Diese Koordinaten werden auch als *Ruhesystem* des Objekts bezeichnet. Ein Objekt, das sich mit konstanter Geschwindigkeit bewegt, folgt einer Geraden mit einem bestimmten Neigungswinkel. Herkömmlicherweise benutzen Physiker einen 45-Grad-Winkel für die Lichtgeschwindigkeit. Die Lichtgeschwindigkeit ist für alle Beobachter und Beobachterinnen gleich, und da sie nicht überschritten werden kann, müssen sich physikalische Objekte auf Geraden bewegen, deren Neigungswinkel kleiner ist als 45 Grad.

Existiert die Vergangenheit im Jetzt?



Wie Raumzeit-Diagramme funktionieren.

Einstein argumentierte nun folgendermaßen: Nehmen wir an, Sie wollen mithilfe von Laserstrahlen, die von Spiegeln zurückgeworfen werden, welche sich relativ zu Ihnen in Ruhe befinden, eine Vorstellung von Gleichzeitigkeit herstellen.* Sie senden einen Puls nach rechts und einen Puls nach links und verlagern Ihre Position zwischen den Spiegeln so lange, bis die Pulse im selben Moment zurückkehren (siehe Abbildung 2a). Dann wissen Sie, dass Sie sich genau in der Mitte befinden und die Laserstrahlen beide Spiegel zur gleichen Zeit (simultan) getroffen haben.

Sobald Sie das getan haben, wissen Sie, zu welchem Zeitpunkt in Ihrer eigenen Zeit der Laserpuls beide Spiegel treffen wird, selbst wenn Sie es nicht sehen können, weil das Licht dieser Ereignisse Sie noch nicht erreicht hat. Sie könnten auf Ihre Uhr schauen und sagen »Jetzt!«. Auf diese Weise haben Sie eine Vorstellung von Gleichzeitigkeit konstruiert, die im Prinzip das ganze Universum umfassen

* Ich habe mich früher darüber gewundert, was Laser so besonders macht, dass sie ständig in Büchern über Raumzeit auftauchen. Die Antwort ist: »Eigentlich nichts.« Nur weil wir wissen, dass sich Laserlicht mit Lichtgeschwindigkeit bewegt (ach nee!) und nicht (viel) streut, eignen sich Laser in besonderem Maße dazu, die Beziehung zwischen Raum und Zeit zu illustrieren.

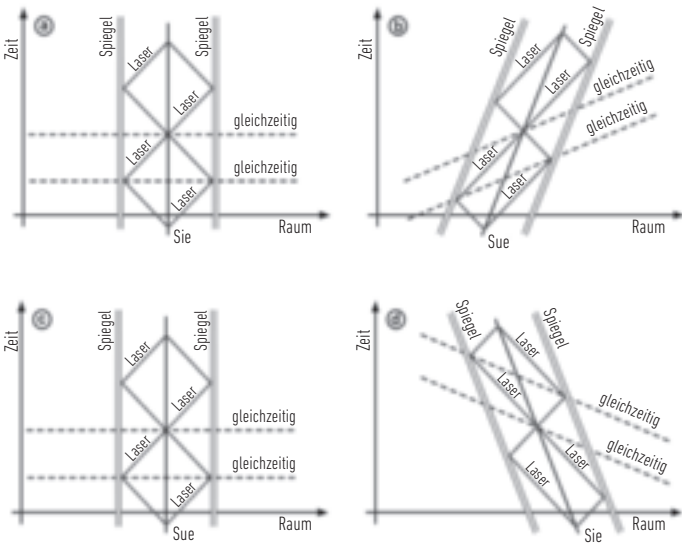


Abbildung 2: Raumzeit-Diagramm zur Konstruktion simultaner Ereignisse. Oben links (a): Sie in Ihrem Ruhesystem mit Koordinaten für Raum und Zeit. Oben rechts (b): Sue in Ihrem Ruhesystem. Unten links (c): Sue in ihrem Ruhesystem mit den Koordinaten Raum' und Zeit'. Unten rechts (d): Sie in Sues Ruhesystem.

könnte. In der Praxis bringen Sie vielleicht nicht die Geduld auf, zehn Milliarden Jahre auf die Rückkehr des Laserpulses zu warten, aber das ist halt Theoretische Physik!

Nun stellen Sie sich vor, Ihre Freundin Sue bewegt sich relativ zu Ihnen und versucht, das Gleiche zu tun (Abbildung 2b). Nehmen wir an, sie bewegt sich von links nach rechts. Sue benutzt ebenfalls zwei Spiegel, einen rechts und einen links von ihr, und die Spiegel bewegen sich in derselben Geschwindigkeit mit ihr – also sind die Spiegel relativ zu Sue in Ruhe, wie es auch für Ihre Spiegel relativ zu Ihnen gilt. Wie Sie sendet Sue Laserpulse in beide Richtungen und

positioniert sich so, dass die Pulse von beiden Seiten gleichzeitig zu ihr zurückkehren. Wie Sie weiß Sue dann, dass die Pulse die beiden Spiegel im selben Moment treffen, und kann berechnen, welchem Zeitpunkt dies auf ihrer eigenen Uhr entspricht.

Das Problem ist, dass Sue ein anderes Ergebnis erhält als Sie. Zwei Ereignisse, die aus Sues Sicht gleichzeitig geschehen, erscheinen aus Ihrer Sicht *nicht* gleichzeitig. Aus Ihrer Perspektive bewegt sich Sue auf einen der Spiegel zu und entfernt sich von dem anderen. Ihnen erscheint es so, als brauche der Puls weniger Zeit, um den Spiegel links von ihr zu erreichen, als der andere Puls braucht, um den Spiegel rechts von ihr zu erreichen. Sue merkt das allerdings nicht, weil auf dem Rückweg der Pulse von den Spiegeln das Umgekehrte geschieht: Der Puls vom Spiegel zu Sues Rechten braucht länger, um sie zu erreichen, während der Puls vom Spiegel zu ihrer Linken schneller eintrifft.

Sie würden behaupten, Sue begehe einen Fehler, doch aus Sues Sicht sind *Sie* es, der einen Fehler macht, denn aus ihrer Sicht sind Sie derjenige, der sich bewegt. Sie ist der Ansicht, dass *Ihre* Laserpulse Ihre Spiegel nicht zur gleichen Zeit treffen (Abbildungen 2c und 2d).

Wer hat Recht? Keiner von beiden. Dieses Beispiel zeigt: In der Speziellen Relativitätstheorie ist die Aussage, dass sich zwei Ereignisse gleichzeitig ereignet haben, bedeutungslos.

Es sei betont, dass diese Argumentation nur deshalb funktioniert, weil Licht kein Medium benötigt, durch das es sich fortpflanzt, und die Lichtgeschwindigkeit (im Vakuum) für alle Beobachter gleich ist. Sie funktioniert zum Beispiel nicht mit Schallwellen (oder irgendeinem anderen Signal, bei dem es sich nicht um Licht im Vakuum handelt), denn dann ist die Signalgeschwindigkeit nicht für alle Beobachter identisch, sondern hängt vom Medium ab, durch das sich das Signal bewegt. In diesem Fall hätte einer von Ihnen objektiv Recht, und der andere läge falsch. Dass Ihre Vorstellung