

Was ist die Zeit? – Gedanken eines Physikers

Deutsche Version eines Beitrags zum “Symposium on Time”
der Europäischen Psychoanalytischen Föderation, Brüssel, April 2022

Gernot Münster*

Universität Münster,
Institut für Theoretische Physik
und Zentrum für Wissenschaftstheorie,
D-48149 Münster, Deutschland

4. März 2022

1 Einführung

Der Begriff der Zeit spielt eine fundamentale Rolle für menschliche Erfahrung, Denken und Empfinden. Unser Weltbild ist ohne den Begriff der Zeit nicht vorstellbar. Was also ist Zeit?

Mit dieser Frage beginnt das sechste Kapitel von Thomas Manns „Der Zauberberg“: „Was ist die Zeit? Ein Geheimnis, - wesenlos und allmächtig. Eine Bedingung der Erscheinungswelt, eine Bewegung, verkoppelt und vermengt dem Dasein der Körper im Raum und ihrer Bewegung. Wäre aber keine Zeit, wenn keine Bewegung wäre? Keine Bewegung, wenn keine Zeit? Frage nur! Ist die Zeit eine Funktion des Raumes? Oder umgekehrt? Oder sind beide identisch? Nur zu gefragt!“ [1]

Für den Physiker ist die Zeit eine fundamental wichtige Größe. Fragen wir also nach dem Wesen der Zeit! Das ist aber eher eine Frage an die Philosophen. Ich bin kein Philosoph. Gestatten Sie mir deshalb für einen Moment auf dünnem Eis zu gehen. In der Literatur finden wir sehr verschiedene Antworten. „Was ist die Zeit?“ ist nach Wittgenstein [2] keine sinnvolle, sondern eine irreführende Frage. „Zeit“ ist nicht Name eines Gegenstandes. Kant hingegen gibt in seiner Transzendentalphilosophie eine Antwort: Bei der Zeit handelt es sich nach Kant um eine reine Form der Anschauung. „Die Zeit ist eine notwendige Vorstellung, die allen Anschauungen zum Grunde liegt. Man kann in

*E-mail: munsteg@uni-muenster.de

Ansehung der Erscheinungen überhaupt die Zeit selbst nicht aufheben, ob man zwar ganz wohl die Erscheinungen aus der Zeit wegnehmen kann. Die Zeit ist also a priori gegeben. In ihr allein ist alle Wirklichkeit der Erscheinungen möglich.“ [3]

Naturwissenschaftler pflegen sich oft burschikoser auszudrücken. Der Physiker John A. Wheeler, Doktorvater von Richard Feynman, hat die Zeit gerne so charakterisiert, wie er es in einem Graffito in der Herrentoilette des Pecan Street Cafe in Austin, Texas, 1976, fand: “Time is nature’s way to keep everything from happening all at once.” [4] (Zeit ist die Methode der Natur, zu verhindern, dass alles auf einmal passiert!)

Das Phänomen Zeit führt auf eine Reihe interessanter Fragen: Hat die Zeit einen Anfang, ein Ende? Kann es „Zeitreisen“ geben? Kann sich die Zeit zyklisch zu einem Kreis schließen? Wie kommt es zu dem Unterschied zwischen Vergangenheit und Zukunft? Welche dieser Fragen kann die Physik beantworten?

Eine Unterscheidung hinsichtlich des Zeit-Begriffes, die in der philosophischen Literatur über die Zeit oft diskutiert wird, hat der Philosoph J. M. E. McTaggart (1866–1925) aus Cambridge gemacht [6]. Er führte die Bezeichnungen A-Reihe und B-Reihe für die zeitliche Ordnung von Ereignissen ein. In der A-Reihe werden Ereignisse eingeteilt in ihre Zugehörigkeit zur Vergangenheit, zur Gegenwart und zur Zukunft. Die Einteilung verändert sich laufend: Ereignisse sind zunächst in der Zukunft, dann in der Gegenwart, und verbleiben schließlich in der Vergangenheit. Die Zeit ist natürlich geordnet in der A-Reihe: für jedes Paar verschiedener Zeiten, t_1 und t_2 , ist entweder t_1 früher als t_2 , oder umgekehrt. Die A-Reihe erlaubt zeitformbehaftete Aussagen (tensed propositions) wie „Gestern hatten wir einen Empfang“. In der B-Reihe sind Zeitpunkte lediglich linear geordnet mit der früher/später-Beziehung. Die Begriffe Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft kommen in ihr nicht vor. Nur zeitformlose Aussagen (tenseless propositions) wie „Am Abend des 8. April hatten wir einen Empfang“ sind in der B-Reihe möglich. Der bedeutendste Unterschied zwischen den beiden Reihen ist die Tatsache, dass es in der A-Reihe ein „Jetzt“ gibt, während dieser Begriff in der B-Reihe fehlt.

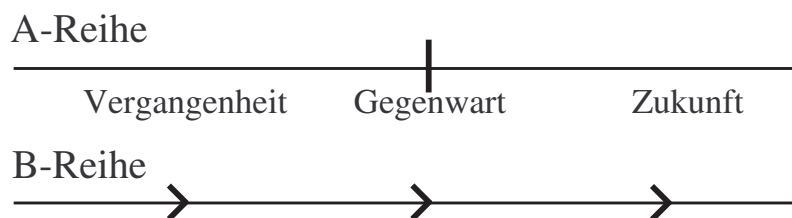


Abbildung 1: McTaggarts A-Reihe und B-Reihe.

In der Philosophie der Zeit werden diejenigen, welche die A-Reihe bzw. die B-Reihe für fundamentaler halten, als A-Theoretiker bzw. B-Theoretiker bezeichnet. Philosophen

diskutieren, ob Zukunft und Vergangenheit real sind, oder ob sie existieren, und sie debattieren über den Status der Gegenwart (siehe z. B. [7]). Ich werde mich hier jedoch nicht mit diesen metaphysischen Fragen auseinandersetzen.

Die Zeit, das Erleben der Zeit und die Messung der Zeit haben philosophische, biologische, physiologische, psychologische, soziologische und physikalische Aspekte, die in den unterschiedlichen Disziplinen verschieden betrachtet werden. Z. B. umfasst in der Physiologie der subjektiv erlebte „Moment“ (das kritische Zeitintervall T_c) eine Zeitspanne von etwa 30 msec, und die „subjektive Gegenwart“ (die mentale Präsenzzeit T_p) dauert mehrere Sekunden [8], während man in der Physik unter Gegenwart die scharfe Grenze zwischen Vergangenheit und Zukunft versteht.

Im folgenden soll es um ein paar Aspekte der Zeit im Rahmen der Physik gehen.

2 Zeit in der Physik

Auf die eingangs gestellte Frage nach dem Wesen der Zeit soll Einstein geantwortet haben: „Zeit ist, was die Uhr anzeigt.“ Was auf den ersten Blick wie eine flapsige Antwort aussieht, ist in Wahrheit Ausdruck seines jahrelangen Ringens um die Grundlagen von Raum und Zeit. Der operationale Zugang zur Zeit, der sich in dem Zitat widerspiegelt, war der Schlüssel zur Aufstellung der Relativitätstheorie. Der damit verbundene Erfolg und Fortschritt im Verständnis der Zeit beruht auf einem Rückzug, einer Vereinfachung, indem im Rahmen der Physik die subjektiven Elemente ausgeblendet werden und man sich mit dem Messbaren bescheidet. Dieser Begriff der Zeit, die mit Uhren gemessen wird, wird „physikalische Zeit“ oder „objektive Zeit“ genannt.

Demgegenüber gibt es die „phänomenologische Zeit“ oder „subjektive Zeit“, die wir in unserem individuellen Erleben verstreichen sehen. Abhängig von unserer jeweiligen Verfassung kann die phänomenologische Zeit schneller oder langsamer als die physikalische Zeit zu laufen scheinen. Auch beinhaltet unser Erleben von Ereignissen und Vorgängen die modale Struktur der Zeit, die der A-Reihe mit ihrer Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft entspricht.

Im Gegensatz dazu kennt die Physik nicht das „Jetzt“. Warum ist das so? Im allgemeinen ist die Physik nicht an einzelnen Ereignissen oder Vorgängen interessiert. Sie interessiert sich nicht für den Fall von Newtons Apfel oder meiner Teetasse. Stattdessen interessiert sie sich für Regelmäßigkeiten, die sie versucht durch Gesetze zu beschreiben, z. B. das Galilei'sche Fallgesetz. Solch ein Gesetz soll (innerhalb seines Anwendungsbereiches und im Rahmen einer gewissen Genauigkeit) universell und zu allen Zeiten gelten. Daher sind Bezüge zu besonderen Zeitpunkten, und insbesondere zum „Jetzt“, in physikalischen Gesetzen nicht gestattet. Allerdings soll erwähnt werden, dass in der Physik in Ausnahmefällen Bezug auf spezielle Zeitpunkte genommen wird, wie etwa in der Astrophysik, in der z. B. die Beobachtung von Gravitationswellen am 14. September 2015 und

Tycho Brahes Supernova vom 11. September 1572 betrachtet werden. Gleichwohl wird sich auf diese Daten in zeitformloser Weise bezogen. Physikalische Aussagen über zeitliche Vorkommnisse werden also generell gemäß der B-Reihe formuliert.

Stehen physikalische Zeit und phänomenologische Zeit in Widerspruch zueinander? Sind die A-Reihe und die B-Reihe unverträglich? Ich meine nicht. Jede Beschreibung zeitlicher Vorgänge oder Ereignisse hat ihren Ursprung in der menschlichen Wahrnehmung. Erfahrungen mittels phänomenologischer Zeit oder mittels physikalischer Zeit, unter Verwendung der A-Reihe bzw. der B-Reihe zu beschreiben heißt, unterschiedliche Darstellungen der gleichen Realität zu verwenden. Die objektive Zeit geht aus der subjektiven Zeit durch Abstraktion hervor, die auf der intersubjektiven Übereinkunft über den Sinn von Uhren beruht.

3 Zeitmessung

Die Messung der Zeit, genauer von Zeitintervallen, erfolgt mit Uhren. Was ist eine Uhr? Charakteristisch für Uhren sind periodische Vorgänge, die zur Festlegung von Zeitspannen herangezogen werden. Im Laufe der Geschichte entwickelte sich die Zeitmessung von der Nutzung der Erddrehung über Wasseruhren und Räderuhren zu moderneren technischen Konstrukten. Ein Meilenstein war der Chronograph von John Harrison aus dem Jahr 1759. Die Entwicklung führte weiter zu den heutigen Quarzuhren und Atomuhren. Die Präzision der gegenwärtig verfügbaren Atomuhren hat Anlass zur gültigen Definition der fundamentalen Zeiteinheit über atomare Vorgänge gegeben: Eine Sekunde entspricht 9 192 632 770 Perioden der Strahlung des Überganges zwischen den beiden Hyperfeinstruktur-Niveaus des Grundzustandes von Atomen des Cäsiums-133.

Lauert hier nicht ein *Circulus vitiosus*? Ist die Definition von Zeiteinheiten über periodische Vorgänge, deren Gleichförmigkeit dabei vorausgesetzt wird, nicht zirkulär? Wäre nicht auch die alte Definition der Stunde und Sekunde über die Drehung der Erde ein ebenso brauchbarer Weg wie derjenige mittels moderner Atomuhren? In diesem Geiste hat Percy W. Bridgman (1882–1961), Gewinner des Physik-Nobelpreises 1946, vorgeschlagen, physikalische Begriffe und Einheiten in operationaler Weise zu definieren [9]. Die Bedeutung einer wissenschaftlichen Größe wäre dann durch ein spezifisches Messverfahren festgelegt. Folglich würde es verschiedene Sekunden geben: eine „Erdsekunde“, eine „Quarzuhr-Sekunde“, eine „Cäsiumuhr-Sekunde“ etc. In meiner Jugend las ich einmal in der Zeitung über die seinerzeit genaueste Atomuhr. Ihre Ganggenauigkeit wurde auch genannt, und ich fragte mich, wie diese bestimmt sein könne, wenn es doch keine genauere Uhr gab, mit der man vergleichen könne. In der Tat, im operationalen Rahmen würde es sinnlos sein, nach der Genauigkeit einer Atomuhr zu fragen, wenn die Zeiteinheiten mittels dieser Uhr definiert wären.

Die tatsächliche Bedeutung der Zeit und die Definition von Zeiteinheiten in der Phy-

sik sind jedoch anders. Der Begriff der Zeit ist theoriegeladen. Sie hat ihre Bedeutung nicht aufgrund eines bestimmten einzelnen periodischen Vorganges, der als gleichförmig festgelegt wird, sondern innerhalb eines gesamten Systems der Naturbeschreibung, das in sich konsistent und einfach sein soll. Die Gesetze der Physik enthalten die Zeit in Form eines Parameters, der oft mit t bezeichnet wird. Beispielsweise wird in der Newton'schen Mechanik die Bewegung eines kräftefreien Teilchens durch die Bewegungsgleichung $\ddot{x} = 0$ und ihre Lösung $x(t) = vt$ mit der Geschwindigkeit v beschrieben. Der Zeitparameter t geht in die Gesetze der Elektrodynamik, Relativitätstheorie, Quantentheorie etc. ein. Er ist ein theoretischer Term, der seine Bedeutung im Rahmen der theoretischen Beschreibung eines Bereichs von Naturerscheinungen erhält. Er wird derart festgelegt, dass die Gesetze der Physik eine einfache Gestalt annehmen. Man stelle sich beispielsweise vor, dass t stattdessen mittels der Erdrotation definiert wäre. Das wäre zwar logisch möglich, aber in diesem Fall wäre die Bewegung eines kräftefreien Teilchens nicht gleichförmig und die verschiedenen Gesetze der Physik würden sehr komplizierte und unpraktikable Gestalten annehmen, da die Erdrotation nicht gleichförmig relativ zu diesen anderen Vorgängen verläuft. Anstatt dessen ist die Zeit ein idealisiertes Konzept, das an die Phänomene und Experimente vermittels Modellen, Idealisierungen und Brückenprinzipien angebunden ist. Zeitliche Intervalle und Einheiten sind dann am besten durch diejenigen Uhren repräsentiert, die gegenwärtig gemäß ihrer physikalischen Beschreibung am gleichförmigsten laufen.

4 Der Zeitpfeil

Mit dem Begriff „Zeitpfeil“ ist die Tatsache gemeint, dass der Zeit eine Richtung inneohnt, durch welche sich die Vergangenheit von der Zukunft unterscheidet. Diese zeigt sich in der Alltagserfahrung und in den Wissenschaften. Die Gerichtetheit der Zeit ist sehr schön von Schiller in Worte gefasst worden:

Dreifach ist der Schritt der Zeit:
 Zögernd kommt die Zukunft hergezogen,
 Pfeilschnell ist das Jetzt entflohen,
 Ewig still steht die Vergangenheit.

Friedrich Schiller, Sprüche des Konfuzius

C. F. von Weizsäcker [10] hat es in dem prägnanten Ausspruch zusammengefasst: „Die Vergangenheit ist faktisch, die Zukunft ist möglich.“ Diese Struktur der Zeit erscheint uns unauflöslich mit dem Begriff der Zeit verknüpft zu sein. Warum ist das so? Hierzu hat wiederum Kant eine tiefe Einsicht gehabt. In unserem Leben machen wir unablässig Erfahrungen. Erfahrung machen heißt aber, aus der Vergangenheit für die Zukunft zu

lernen. Diese Struktur der Zeit, der Unterschied zwischen Vergangenheit und Zukunft, ist also eine notwendige Bedingung für die Möglichkeit der Erfahrung.

Die Physik ist eine empirische Wissenschaft, sie gründet sich auf Erfahrung. Der Zeitpfeil ist somit Voraussetzung für Physik. Daher liegt es nahe anzunehmen, dass die Physik den Zeitpfeil nicht begründen kann. Ist das tatsächlich so? Ich denke nicht. Der Zirkel, der entsteht, wenn die Physik nach einem physikalischen Grund für den Zeitpfeil sucht, muss nicht vitiös sein. Es ist eine Frage der semantischen Konsistenz [10], ob die physikalische Begründung für den Zeitpfeil, ausgedrückt in der Sprache der Physik, und der Zeitpfeil als Voraussetzung für Physik zueinander passen. Wenden wir uns also der Frage einer eventuellen physikalischen Begründung für den Zeitpfeil zu. Hierzu gibt es eine Fülle an Literatur, von der ich aber lediglich die Bücher [5, 11, 12] erwähnen möchte.

Die fundamentalen Gesetze der Physik, welche die Teilchen und ihre Wechselwirkungen beschreiben, sind zeitlich umkehrbar.¹ Jeder Vorgang kann auch in umgekehrter zeitlicher Folge ablaufen. Die in der Natur ablaufenden Vorgänge sind aber offenbar nicht zeitlich umkehrbar: Eine zu Boden fallende Tasse zerspringt in viele Teile, der umgekehrte Vorgang wurde noch nie beobachtet. Wie kommt das zustande? Woher rührt dieser Zeitpfeil, der wohl nicht in den fundamentalen Gesetzen der Natur angelegt ist?

Bei genauerem Hinsehen kann man mehrere Zeitpfeile unterscheiden:

1. psychologisch: unsere Erinnerung richtet sich in die Vergangenheit und nicht in die Zukunft,
2. thermodynamisch: nach dem 2. Hauptsatz der Thermodynamik nimmt die Entropie stets zu (ich lasse die Details und notwendigen Voraussetzungen für dieses Gesetz hier aus),
3. elektrodynamisch: Strahlung breitet sich von der Quelle mit fortschreitender Zeit aus und fließt nicht konzentrisch hinein,
4. quantentheoretisch: die Zustandsänderungen im Messprozess eines Quantensystems sind unumkehrbar,
5. kosmologisch: das Weltall dehnt sich aus.

Eine genauere Betrachtung zeigt, dass die Zeitpfeile 1-4 miteinander zusammen hängen. Die mit ihnen verbundenen irreversiblen Vorgänge laufen aufgrund von Wahrscheinlichkeitsgesetzen ab, welche ein Fortschreiten von geordneten zu mehr ungeordneten Zuständen beschreiben. Dabei wächst insgesamt die Unordnung der betrachteten Systeme. Obwohl es kontraintuitiv erscheinen mag, gilt dies auch für unsere Erinnerung. Sich eines

¹Eine Ausnahme davon gibt es in den mikrophysikalischen Gesetzen für die schwachen Wechselwirkungen der Elementarteilchen (CP-Verletzung), die jedoch für die vorliegende Diskussion keine Rolle spielen.

Ereignisses zu erinnern bedeutet, dass es Spuren in unserem Gedächtnis hinterlassen hat, die durch gewisse neuronale Strukturen realisiert sind. Spuren stellen generell Überbleibsel irreversibler Prozesse dar, die mit einem Anwachsen der gesamten Unordnung (Entropie) verbunden sind.

In der Physik ist die Entropie ein Maß für die Unordnung eines Systems. Der Zeitpfeil lässt sich in diesem Fall darauf zurückführen, dass ein geordneter Anfangszustand (mit niedriger Entropie) vorgelegen hat. Während die Gesetze zeitlich umkehrbar sind, führen die Anfangsbedingungen zu einer Unumkehrbarkeit von Vorgängen. Die Frage nach dem Zeitpfeil führt daher zu der Frage nach dem Ursprung des geordneten Anfangszustandes. Hierauf gibt es noch keine allgemein akzeptierte Antwort, allerdings gibt es eine plausible Hypothese, wonach der Ursprung in der Kosmologie begründet ist, und die Expansion des Weltalls als eine Art „Master-Zeitpfeil“ wirkt.

Eine Bemerkung ist hier angebracht. Auf der Erde beobachten wir doch oft das Entstehen von geordneten Strukturen im anscheinenden Widerspruch zum Anwachsen der Unordnung (Entropie). Dieser Widerspruch ist nur scheinbar: In offenen Systemen kann die Komplexität lokal anwachsen auf Kosten der Unordnung in der Außenwelt [13]. Die Evolution steht nicht in Konflikt mit der Thermodynamik.

5 Relativitätstheorie

Es ist nicht möglich, als Physiker über Zeit zu sprechen, ohne die Relativitätstheorie zu berücksichtigen. Begründet wurde sie in einer der fünf berühmten Arbeiten aus Einsteins Wunderjahr 1905 mit dem Titel „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“. Der Titel hört sich unscheinbar an und eher recht technisch. Aber in dieser Arbeit geht es um das Wesen von Raum und Zeit. In ihr wirft Einstein Jahrtausende alte Auffassungen von Raum und Zeit über den Haufen.

Schwierigkeiten in der Elektrodynamik und Optik führten Einstein zu einer Untersuchung der Grundlagen im Verständnis von Raum und Zeit. In den Jahren 1902 bis 1909 war er in Bern im Amt für geistiges Eigentum tätig. Seinem Freund Conrad Habicht schrieb er [14]: „Nach acht Dienststunden im Patentamt gibt es noch acht Stunden Allostria und noch einen Sonntag.“ Das Ergebnis hiervon war die Relativitätstheorie, die eine radikale neue Besinnung über Raum und Zeit mit sich brachte. Ihre Konsequenzen sind die

1. Relativität der Gleichzeitigkeit,
2. Relativität der Zeit,
3. Relativität von Längen.

Ich möchte ein paar Bemerkungen zur Relativität der Zeit machen. Was ist darunter zu verstehen? Der Ablauf der Zeit, genauer gesagt der Gang von Uhren, hängt davon ab, wie sich der Beobachter und die Uhr relativ zueinander bewegen. Eine Uhr, die sich relativ zu uns mit einer gewissen Geschwindigkeit bewegt, geht langsamer als eine ruhende Uhr. Hält Laufen daher jung? Nun, der Effekt ist für gewöhnliche Geschwindigkeiten äußerst gering. Der Faktor, um den eine bewegte Uhr langsamer geht, beträgt für einen Radfahrer 1,00000000000000017, das entspricht 1 Sekunde in 200 Millionen Jahren. Erst bei Geschwindigkeiten, die mit der Lichtgeschwindigkeit von 299 792,458 km/s vergleichbar sind, wird der Effekt nennenswert. Bei 90% der Lichtgeschwindigkeit beträgt der Faktor 2,3 und bei 99% der Lichtgeschwindigkeit schon 7,1.

Wichtig ist, dass davon nicht nur artifizielle Uhren betroffen sind, sondern alle Vorgänge, also auch biologische. Es ist die Zeit selbst, deren Verstreichen relativ ist. Die Relativität der Zeit wird gerne im so genannten Zwillingsparadoxon veranschaulicht: Ein Zwilling verlässt die Erde in einem Raumschiff, welches mit hoher Geschwindigkeit ins Weltall fährt und nach einigen Jahren wieder zurückkehrt. Während der auf der Erde verbliebene Zwilling zum Greis gealtert ist, entsteigt dem Raumschiff seine deutlich weniger gealterte Schwester. Zwar liegt die Realisierung dieser Geschichte weit außerhalb der heutigen Möglichkeiten, der Effekt wurde jedoch mit Hilfe von Atomuhren in Flugzeugen experimentell bestätigt.

Die aus der Relativitätstheorie folgenden Effekte sind keineswegs esoterische Spinnereien der Wissenschaftler, sondern spielen in vielen Bereichen der heutigen Physik und Technik eine Rolle. Als Beispiel sei das GPS (Global Positioning System) genannt. Ohne Berücksichtigung der Relativitätstheorie würde sich in den GPS-Geräten täglich ein Fehler von 10 km aufsummieren und einige von Ihnen hätten heute den Veranstaltungsort weit verfehlt.

6 Gleichzeitigkeit

Die Relativität der Gleichzeitigkeit ist eine Konsequenz der Relativitätstheorie, die für unser Verständnis der Zeit von entscheidender Bedeutung ist. Überraschenderweise hat sie unter Philosophen recht wenig Beachtung gefunden. Ausnahmen davon sind z. B. H. Putnam [15] und Arbeiten, die in [16] zitiert werden.

In der Physik vor Einstein herrschte die Vorstellung von der absoluten Zeit, die für jeden Beobachter gleichermaßen universell gültig und messbar ist. Bei Newton heißt es dazu in den „*Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*“, 1687 [17]: „Die absolute, wahre und mathematische Zeit verfließt an sich und vermöge ihrer Natur gleichförmig und ohne Beziehung auf irgendeinen äußeren Gegenstand.“

Aus der Existenz einer absoluten Zeit folgt die Möglichkeit globaler Gleichzeitigkeit. Wenn in der Newton'schen Raumzeit ein Ereignis A an einem bestimmten Ort x_A zu einer

bestimmten Zeit t_A stattfindet, dann ist ein Ereignis B, das an irgend einem anderen Ort zur selben Zeit t_A stattfindet, gleichzeitig mit A. Die Existenz eines absoluten Begriffs von Gleichzeitigkeit gestattet es, die Begriffe Zukunft, Gegenwart und Vergangenheit eindeutig zu definieren, siehe Abb. 2. Was hier für mich *jetzt* ist, ist für jeden anderen an irgend einem Ort ebenfalls *jetzt*.

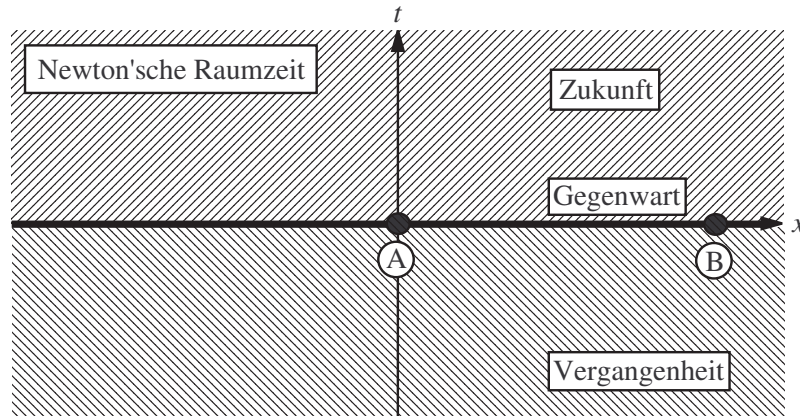


Abbildung 2: Newton'sche Raumzeit. Abgebildet sind die Zeitachse und eine räumliche Achse. Die globale Gegenwart ist durch eine dicke horizontale Linie gekennzeichnet.

Die relativistische Situation unterscheidet sich grundlegend von der Newton'schen. Die Geometrie der Raumzeit wird durch den sogenannten Minkowski-Raum dargestellt, siehe Abb. 3.

Die globale Vergangenheit und die globale Zukunft eines Ereignisses A in der Newton'schen Raumzeit sind nun ersetzt durch zwei Gebiete, die von A abhängen, und die „kausale Vergangenheit“ und „kausale Zukunft“ genannt werden. (Wählt man der Einfachheit halber $x_A = 0$ and $t_A = 0$, sind diese Gebiete durch die Bedingungen $t \leq -|x|/c$ bzw. $t \geq +|x|/c$ festgelegt, wobei c die Lichtgeschwindigkeit ist.) Aus der Newton'schen Gegenwart ist ein ganzes Gebiet der Raumzeit zwischen Vergangenheit und Zukunft geworden, deren Punkte „raumartig zu A“ genannt werden.

Welche Punkte des Minkowski-Raumes sind gleichzeitig mit A? Betrachten wir die folgende Situation in Abb. 3. Der Physiker Bob arbeitet in einem entfernten Labor. Zu einem bestimmten Zeitpunkt schaut er nach dem Ergebnis eines quantenphysikalischen Experiments. Dieses Ereignis ist mit B gekennzeichnet. Wir wollen annehmen, dass das Ergebnis des Experiments nicht vorherbestimmt ist. Für Bob ist der Ausgang des Experiments vor B offen, und danach faktisch. Am Punkt A fragt sich die Philosophin Alice, was beim Experiment des Physikers Bob heraus gekommen ist. Für sie stellt sich die Frage, ob das Ereignis B bereits stattgefunden hat oder nicht. Das läuft auf die Frage der

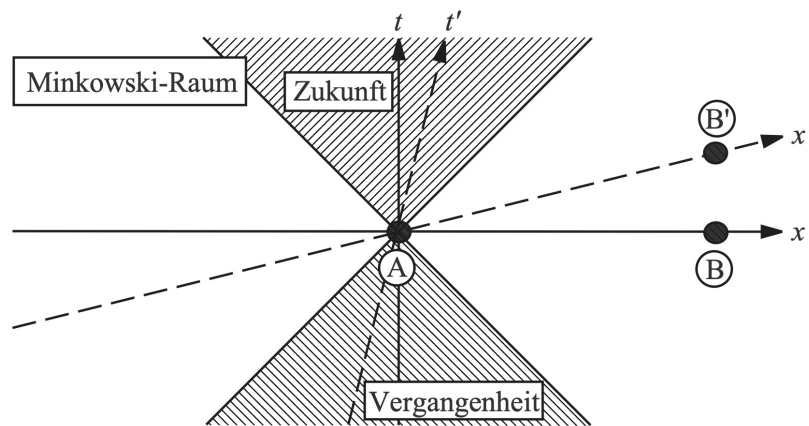


Abbildung 3: Minkowski-Raum. Abgebildet sind die Zeitachse und eine räumliche Achse. Es ist zu beachten, dass zugunsten besserer Sichtbarkeit relativistischer Effekte die Einheiten so gewählt sind, dass die Ausbreitung von Licht entlang diagonaler Linien stattfindet. Wenn also 1 cm auf der t -Achse 1 Sekunde entspricht, dann entspricht 1 cm auf der x -Achse 300 000 km. Kausale Vergangenheit und kausale Zukunft sind als Vergangenheit und Zukunft abgekürzt. Abhängig von der Geschwindigkeit eines Beobachters bei A sind die Ereignisse B oder B' Einstein-gleichzeitig mit A.

Gleichzeitigkeit von A und B heraus.

Betrachtet man die Abb. 3, scheint es, als seien A und B gleichzeitig. Jedoch war es Einsteins revolutionäre Erkenntnis, dass es kein eindeutiges Konzept von Gleichzeitigkeit gibt. Er zeigte, dass man zwar eine Art von Gleichzeitigkeit definieren kann, die man „Einstein-Gleichzeitigkeit“ nennt, dass diese aber von der Geschwindigkeit der Beobachterin A abhängt und daher ein relativer Begriff ist. Ich empfehle Einsteins wunderbares Büchlein *Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie* [18], in welchem er diese Dinge anhand von fahrenden Zügen allgemeinverständlich erläutert. Wenn die x - und die t -Achse in Abb. 3 zum Ruhesystem von Alice gehören, sind die Punkte auf der x -Achse, inklusive B, Einstein-gleichzeitig mit A. Wie bereits oben erwähnt, hängt dies aber von der Bewegung von Alice ab. Wenn sie sich nun durch ihr Zimmer bewegt, wird ihr Ruhesystem durch die x' - und t' -Achsen dargestellt, die aus den vorigen Koordinaten durch eine Lorentz-Transformation hervorgehen. (Zur besseren Sichtbarkeit sind die Winkel in der Abbildung übertrieben dargestellt.) Das Ereignis in Bobs Labor, das Einstein-gleichzeitig mit A ist, ist nun durch B' markiert. In alltäglichen Situationen ist der Unterschied extrem klein. Um des Prinzips willen lassen Sie uns aber den Fall betrachten, dass Bobs Labor sich in der Andromeda-Galaxie befindet. Wenn Alice sich mit 3 km/s auf ihn zu bewegt, ist das Ereignis B' um die beträchtliche Zeit von 9 Tagen später als B.

Eine Bemerkung ist an dieser Stelle angebracht. Die Abb. 3 könnte nahelegen, dass das x - t -Koordinatensystem bevorzugt ist aufgrund des Winkels von 90° zwischen seinen Achsen. Dabei handelt es sich jedoch um eine optische Täuschung. Diese Orthogonalität hat keine Bedeutung in der Minkowski-Geometrie. Die gleiche Situation kann in äquivalenter Weise wie in Abb. 4 dargestellt werden.

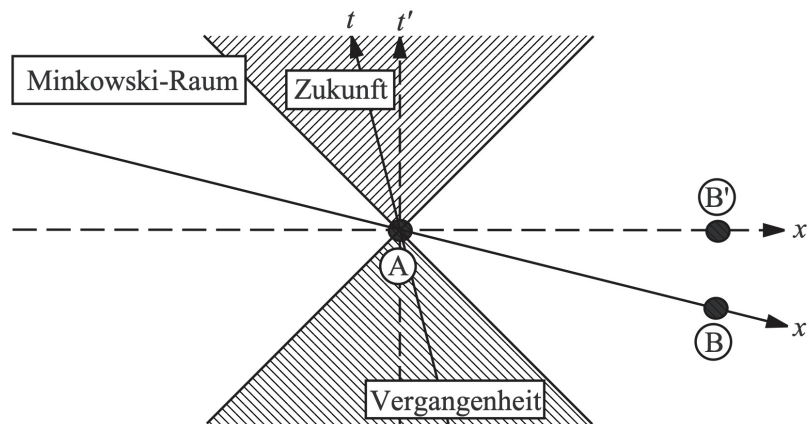


Abbildung 4: Minkowski-Raum. Die gleiche Situation wie in Abb. 3 ist auf andere Weise, aber äquivalent abgebildet.

Wir müssen feststellen, dass es für Ereignisse an Bobs Ort keine inhärent Bedeutung hat, gleichzeitig mit dem Ereignis A zu sein. Folglich müssen wir auch erkennen, dass es für Alice keine eindeutige Möglichkeit gibt, einen von Bobs Zeitpunkten als „Jetzt“ zu betrachten, d. h. gleichzeitig mit ihrem „Jetzt“.

Die unausweichliche Schlussfolgerung aus dieser Überlegung ist diese: Für Alice, die jetzt an Bobs Experiment denkt, gibt es keine Möglichkeit, Aussagen darüber, ob der Ausgang des Experiment schon abgeschlossen oder noch offen ist, einen Sinn zu geben. Das ist eine schwerwiegende Herausforderung für unser Verständnis von Realität, insbesondere für A-Theoretiker. Ich betrachte dies als das ernsthafteste Problem der Philosophie der Zeit.

Einstein scheint sich der Konsequenzen der Relativität der Gleichzeitigkeit bewusst gewesen zu sein. Vermutlich gelangte er zu einem deterministischen Weltbild, in dem es keinen Platz für eine offene Zukunft gibt. Kurz vor seinem Tod im Jahr 1955 schrieb er in einem Brief an die Familie seines verstorbenen Freundes Michele Besso [19]: „Für uns gläubige Physiker hat die Scheidung zwischen Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft nur die Bedeutung einer, wenn auch hartnäckigen, Illusion.“

Literatur

- [1] Thomas Mann, *Der Zauberberg*, S. Fischer Verlag, Frankfurt am Main, 2002.
- [2] L. Wittgenstein, *Das blaue Buch*, 1970.
- [3] I. Kant, *Kritik der reinen Vernunft, Der transzendentalen Ästhetik Zweiter Abschnitt, Von der Zeit*, 1781.
- [4] J. A. Wheeler, *Time Today*, in [5].
- [5] J. J. Halliwell, J. Pérez-Mercader und W. H. Zurek (Hrsg.), *Physical Origins of Time Asymmetry*, Cambridge University Press, 1994.
- [6] J. M. E. McTaggart, *The unreality of time*, *Mind* 17 (1908) 457–474.
- [7] *Questions of Time and Tense*, R. Le Poidevin (Hrsg.), Clarendon Press, Oxford, 1998.
- [8] O.-J. Grüsser, *Zeit und Gehirn*; E. Pöppel, *Erlebte Zeit und die Zeit überhaupt*; beide in: *Die Zeit – Dauer und Augenblick*, H. Gumin und H. Meier (Hrsg.), Piper Verlag, München, 1989.
- [9] P. W. Bridgman, *The Logic of Modern Physics*, Macmillan Co., New York, 1927.
- [10] C. F. von Weizsäcker, *Die Einheit der Natur*, Carl Hanser Verlag, München, 1971.
- [11] H. D. Zeh, *The Physical Basis of the Direction of Time*, Springer, Berlin, 1992.
- [12] P. C. W. Davies, *The Physics of Time Asymmetry*, University of California Press, 1974.
- [13] I. Prigogine, *Time, Structure and Fluctuations*, Nobel-Vorlesung, 8. Dezember 1977.
- [14] Brief von Albert Einstein an Conrad Habicht, 1905, in: *The Collected Papers of Albert Einstein, Volume 5: The Swiss Years: Correspondence, 1902–1914*, M. J. Klein, A. J. Kox und R. Schulmann (Hrsg.), Princeton University Press, 1994.
- [15] H. Putnam, *Time and Physical Geometry*, *The Journal of Philosophy* 64 (1964) 240–247.
- [16] C. Wüthrich, *The fate of presentism in modern physics*, in: *New Papers on the Present – Focus on Presentism*, R. Ciuni, K. Miller und G. Torrenco (Hrsg.), Philosophia Verlag, München, 2013, S. 91–131.
- [17] “Absolute, true, and mathematical time, of itself, and from its own nature, flows equably without relation to anything external.”

- [18] A. Einstein, *Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie*, Vieweg, Braunschweig, 1917.
- [19] Brief von Einstein an Vero und Beatrice Besso, 21. März 1955, in: *Albert Einstein – Michele Besso. Correspondance 1903–1955*, P. Speziali (Hrsg.), Hermann, Paris, 1972, S. 537–538.