

Raum und Zeit bei Einstein

Hartmann Römer

1. Die absolute Raum- Zeit Newtons

Mit Recht sagt man, Einstein habe die Vorstellung von Raum und Zeit mit seiner Speziellen und Allgemeinen Relativitätstheorie revolutioniert. Nun sind Raum und Zeit nicht nur, ja nicht einmal in erster Linie physikalische Begriffe. Sie sind die allgegenwärtigen strukturierenden Begleiter unseres Lebens, Wahrnehmens und Denkens. Jeder Versuch, diese Begleiter auch nur für einen Augenblick abzuschütteln und wegzudenken führt sofort in schwerste, wenn nicht unüberwindliche Schwierigkeiten. Raum und Zeit sind von jeher auch Gegenstand philosophischen Nachdenkens gewesen. Einsteins umstürzende Erkenntnisse betreffen also nicht nur die Physik, sondern sind für jeden von unmittelbarer existenzieller und philosophischer Bedeutung.

Als Einstein im Jahre 1905 die Spezielle Relativitätstheorie formulierte, herrschte unter Physikern die Newtonsche Vorstellung vom absoluten Raum und der absoluten Zeit fast unumstritten. Auf ihr gründet das großartige Gebäude der Newtonschen Mechanik, der ersten erfolgreichen umfassenden physikalischen Theorie. Sie erklärt gleichermaßen das Fallen eines Steins und den Lauf der Planeten, und sie steht am Anfang des Siegeszuges der Physik als strenger Wissenschaft.

Der Raum gleicht bei Newton einer riesigen Schachtel, deren Wände man sich ins Unendliche verschoben denken sollte. Diese Schachtel könnte auch leer sein, in der Tat aber enthält sie den gesamten Bestand der physikalischen Welt, ohne in irgendeiner Weise durch ein physikalisches Geschehen beeinflussbar zu sein. Die Zeit ist wie eine Weltuhr oder ein Metronom, das unbeeinflussbar tickt und jedem Ereignis seinen Zeitpunkt und jeder Bewegung ihr Zeitmaß zuweist.

Denkt man sich im Raum ein ruhendes Dreibein mit Standardmaßstäben auf seinen Achsen aufgestellt, so hat man, zusammen mit der Weltuhr ein *Koordinatensystem* realisiert, das jedem Ereignis von genügend geringer Dauer und räumlicher Ausdehnung vier Koordinaten zuordnet, nämlich eine Zeitkoordinate und drei räumliche Koordinaten. Bezüglich eines solchen Koordinatensystems bewegt sich nach dem Newtonschen Trägheitsgesetz ein Körper, auf den keine Kräfte einwirken, geradlinig und gleichförmig. Ein Koordinatensystem, mit dieser Eigenschaft heißt *Inertialsystem*. Erstaunlicher Weise lässt sich in der Newtonschen Mechanik nicht feststellen, ob ein Beobachter mit seinem Koordinatensystem im absoluten Raum ruht oder geradlinig und gleichförmig bewegt ist. Es gilt vielmehr das *Newtonsche Relativitätsprinzip*:

N1) Alle gegenüber einem Inertialsystem geradlinig und gleichförmig bewegten Bezugssysteme sind physikalisch gleichwertige Inertialsysteme.

N2) Zeitliche und räumliche Abstände sind in allen Inertialsystemen gleich.

Hierbei ist die zweite Aussage einfach eine Folge der Absolutheit von Raum und Zeit bei Newton. Aus dem Newtonschen Relativitätsprinzip folgt durch eine einfache mathematische Überlegung, dass die Umrechnung der Koordinaten von einem Inertialsystem in ein anderes durch so genannte *Galilei-Transformationen* erfolgt. Wenn wir die Inertialsysteme mit I und I' bezeichnen und annehmen, dass sich I' in Bezug auf I mit der Geschwindigkeit v in x-Richtung bewegt, dann lautet die Galilei-Transformation im einfachsten Fall

$$t = t' , \quad x = x' + v t' , \quad y = y' , \quad z = z'$$

Eine direkte Folge davon ist das Additionsgesetz der Geschwindigkeiten: Wenn ein Körper im Bezugssystem I' die Geschwindigkeit w (in x -Richtung) hat, dann ist seine Geschwindigkeit im System I durch $V = v + w$ gegeben.

Die Newtonsche Vorstellung des absoluten Raumes und der absoluten Zeit erscheint heute wohl den meisten Menschen als unmittelbar anschaulich, einleuchtend, ja geradezu selbstverständlich, zu Newtons Zeit war sie ungewohnt und kühn. Insbesondere hielten die meisten Philosophen, etwa Descartes, den leeren Raum für ein gedankliches Unding. Viel befriedigender erschien es, sich den Raum lückenlos mit einem ruhenden feinstofflichen Medium, dem Äther erfüllt zu denken. Zugleich könnte, so dachte man, der Äther die Ausbreitung von Licht in ähnlicher Weise tragen, wie sich Schall in der Luft ausbreitet. Sogar Newton selbst hat in der Frage nach der Existenz eines Äthers sein Leben lang eine schwankende Position eingenommen.

2. Spezielle Relativitätstheorie

Wenn es den Äther mit den genannten Eigenschaften gäbe, dann könnte allerdings in der absoluten Newtonschen Raum-Zeit das Newtonsche Relativitätsprinzip zwar noch für mechanische Erscheinungen gelten, nicht aber für die Ausbreitung von Licht: Nur in einem Inertialsystem, das in Bezug auf den absoluten Raum ruhte, könnte sich das Licht in allen Richtungen mit der gleichen Geschwindigkeit ausbreiten. In allen anderen Inertialsystemen müsste wegen des Additionsgesetzes der Geschwindigkeiten die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes in Richtung der Bewegung des Beobachters gegen den absoluten Raum und den Äther kleiner sein als in Gegenrichtung. Alle Bemühungen, eine Bewegung gegen den absoluten Raum mit Lichtausbreitungsexperimenten nachzuweisen, sind allerdings fehlgeschlagen. Am bekanntesten in diesem Zusammenhang ist wohl das Experiment von Michelson und Morley.

Dieses Dilemma war im Jahre 1905 wohlbekannt, und es wurden die verschiedensten Zusatzhypothesen vorgeschlagen, um die Vorstellung der Newtonschen Raum-Zeit und die Beobachtungen bei der Lichtausbreitung miteinander zu versöhnen.

In dieser verworrenen Lage wagte Einstein den mutigen Schritt, nicht nur die physikalische Gleichwertigkeit aller Inertialsysteme, sondern auch die mit allen gescheiterten Versuchen zum Nachweis einer Bewegung gegen den Äther im Einklang stehende Unabhängigkeit des Gesetzes der Lichtausbreitung vom Inertialsystem zum Prinzip zu erheben. Das Ergebnis ist das *Einsteinsche Relativitätsprinzip*:

E1) Alle gegenüber einem Inertialsystem geradlinig und gleichförmig bewegten Bezugssysteme sind physikalisch gleichwertige Inertialsysteme.

E2) Das Licht breitet sich in allen Inertialsystemen in allen Richtungen mit derselben universellen Geschwindigkeit c aus.

E1) ist mit N1) identisch, wobei die Gleichwertigkeit der Inertialsysteme für sämtliche physikalische Erscheinungen betont wird. E2) unterscheidet sich radikal von N2)

Aus dem Einsteinschen Relativitätsprinzip folgt sofort, dass der Übergang zwischen Inertialsystemen nicht mehr durch Galilei-Transformationen vermittelt werden kann. Wie eine einfache mathematische Überlegung zeigt, wird er vielmehr durch so genannte Lorentz-Transformationen beschrieben, die im einfachsten Fall die folgende Gestalt haben:

$$\begin{aligned}t &= \gamma(t' + vx' / c^2) \\x &= \gamma(x' + vt'), y = y', z = z' \\ \gamma &= 1 / \sqrt{1 - v^2 / c^2}\end{aligned}$$

Das Gesetz der Addition der Geschwindigkeiten ist zu ersetzen durch

$$V = \frac{v + w}{1 + vw/c^2}.$$

(Man sieht: Wenn $w = c$, dann ist auch $V = c$, die Geschwindigkeit eines Lichtstrahls vergrößert sich also auch dann nicht, wenn man ihm mit einer Geschwindigkeit v entgegenläuft) In unsere Welt sind die Geschwindigkeiten bewegter Körper sehr klein im Vergleich zur Lichtgeschwindigkeit c , die etwa dreihunderttausend Kilometer pro Sekunde beträgt (Das ist in einer Sekunde etwa siebeneinhalbmal der Erdumfang. Die Geschwindigkeit eines Düsenflugzeugs ist etwa dreihundert Meter pro Sekunde, also nur ein Millionstel der Lichtgeschwindigkeit. Das Quadrat von v/c ist dann sogar nur ein Billionstel.)

Wenn die Geschwindigkeit v sehr viel kleiner als die Lichtgeschwindigkeit ist, dann gehen die Lorentz-Transformationen in sehr guter Näherung in die Galilei-Transformationen über. Dies ist der Grund dafür, dass man den Unterschied zwischen den beiden Transformationsgesetzen im täglichen Leben gewöhnlich nicht bemerkt und für praktische Zwecke mit dem Gesetz der Galilei-Transformation arbeiten kann.

Aus der Gestalt der Lorentz-Transformation ersieht man sofort, dass sich die Zeitkoordinate t beim Übergang von einem Inertialsystem auf ein anderes verändert. Insbesondere folgt aus $t = 0$ nicht $t' = 0$, sodass Ereignisse, die in einem Inertialsystem gleichzeitig sind, in einem anderen Inertialsystem nicht gleichzeitig sein werden. Die Newtonsche Vorstellung einer absoluten Zeit ist also nicht mit dem Einsteinschen Relativitätsprinzip verträglich und muss in der Speziellen Relativitätstheorie aufgegeben werden. Diese einfache, wenn auch überraschende Folgerung aus dem experimentell bestens belegten Einsteinschen Relativitätsprinzip ist von Anfang an und bis auf den heutigen Tag auf heftige Ablehnung gestoßen. Die Gründe dafür waren und sind vielfältig: dumpfer Antisemitismus, misstrauischer Antiintellektualismus, starres Bestehen auf dem so genannten gesunden Menschenverstand. Noch vor kurzem habe ich ein Zuschrift in Buchform erhalten, in der ausgeführt wurde, die Spezielle Relativitätstheorie müsse falsch sein, da sie in krassem Widerspruch zum gesunden Menschenverstand stehe, ihr gesamter mathematischer Apparat diene nur der Vernebelung dieser Tatsache und Abhilfe schaffe nur eine Diktatur des gesunden Menschenverstandes. Schon der Name „Relativitätstheorie“ hat vielfach Anstoß erregt, da man aus ihm frivole Relativierung absoluter Werte zu vernehmen glaubte.

Ernster zu nehmen sind philosophische Einwände, etwa, wenn unter Berufung auf die Kantische Philosophie betont wird, die Struktur von Raum und Zeit könnten gar nicht Gegenstand einer physikalischen und experimentellen Untersuchung sein, da sie a priori vor aller Erfahrung als Formen des menschlichen Erkenntnisvermögens vorgegeben seien. Wir werden auf diesen Einwand noch eingehen müssen.

Einige weitere wichtige und höchst überraschende Konsequenzen der Speziellen Relativitätstheorie seien hier genannt:

- Das so genannte *Zwillingsparadoxon*: Wenn von einem Zwillingpaar der eine Zwilling in einem Inertialsystem ruht, der andere aber eine Rundreise mit hoher Geschwindigkeit unternimmt, dann wird bei Ihrer Wiederbegegnung der weit gereiste Zwilling weniger gealtert sei als der zu Hause gebliebene. Der Unterschied ist umso größer je näher die Reisegeschwindigkeit an der Lichtgeschwindigkeit liegt. Dieser Effekt, vielfach angezweifelt, ist inzwischen durch Experimente an zerfallenden rasch bewegten Elementarteilchen und sogar durch den Transport sehr genauer Uhren in Linienflugzeugen bestens bestätigt.
- *Verkürzung bewegter Maßstäbe*. Die Länge eines in einem Inertialsystem gleichförmig bewegten Stabes kann man auf zwei Weisen messen. Entweder registriert man zu

ein und derselben Zeit die Positionen seines Anfangs und Endes und misst deren Abstand, oder man registriert in einen festen Punkt des Raumes den Vorbeiflug von Anfang und Ende des Stabes und berechnet die Länge aus der verstrichenen Zeit und der Geschwindigkeit v des Stabes. In beiden Fällen ergibt sich dass ein bewegter Stab im Vergleich zu einem ruhenden um einer Faktor $\sqrt{1 - v^2 / c^2}$ verkürzt gemessen wird.

Auch dies ist experimentell bestätigt. Übrigens ist das Bild, das ein bewegter Stab dem Auge eines Beobachters bietet auf ganz andere Weise durch die gleichzeitig auf der Netzhaut des Beobachters eintreffenden und von den verschiedenen Teilen des Stabes ausgehenden Lichtwellen bestimmt und nicht verkürzt, sondern in sehr interessanter Weise gedreht und verzerrt.

- Aus der Gestalt der Lorentz-Transformation liest man unmittelbar ab, dass die Lichtgeschwindigkeit c eine unerreichbare Grenze für die möglichen Relativgeschwindigkeiten von Inertialsystemen darstellt. Eine genauere Betrachtung zeigt, dass keine kausale Einwirkung und kein Signal die Lichtgeschwindigkeit übertreffen kann, Lichtsignale, die sich gerade mit der Geschwindigkeit c ausbreiten, sind die schnellsten möglichen Signale.
- In der Galilei-Transformation verhalten sich Raum- und Zeitkoordinaten unterschiedlich: Die Zeitkoordinate bleibt unverändert, während die neue Raumkoordinate von den alten Raum- und Zeitkoordinaten abhängt. Die Lorentz-Transformation der Speziellen Relativitätstheorie mischt Raum- und Zeitkoordinaten in derselben Weise. Raum und Zeit rücken enger zusammen und verschmelzen in einem einheitlichen Raum-Zeit-Kontinuum. Wir werden noch sehen, dass hierbei die Zeit verräumlicht und nicht etwa der Raum verzeitlicht wird.
- $E = mc^2$: Es zeigt sich, dass beim Wechsel des Inertialsystem die Zahlenwerte von Energie und Impuls ebenso durch eine Lorentz-Transformation ineinander transformiert werden wie Zeit- und Raumkoordinaten. Hieraus folgt, dass Energie und Masse wesensgleich sind: Energie kann mit einer Waage gemessen werden. Jede Energie E hat die träge (und auch schwere) Masse $m = E/c^2$. Eine aufgezugene Uhr ist schwerer als eine abgelaufene, ein erhitzter Körper schwerer als ein abgekühlter. Ebenso enthält ein Körper der Masse m die Energie $E = mc^2$. Dies ist vielleicht die bekannteste Formel der Physik. Sie ist übrigens nicht, wie oft behauptet, die physikalische Grundlage für Kernkraftwerke und Atombomben. Die Energie aus der Kernspaltung stammt aus der Umlagerung der im Kern, bzw. in seinen Fragmenten enthaltenen Protonen und Neutronen. Die Einsteinsche Formel erlaubt lediglich eine Abschätzung der bei der Spaltung frei werdenden Energie durch Vergleich der Massen des gespaltenen Kerns mit der seiner Spaltprodukte.

Zwar ist die Gleichzeitigkeit von Ereignissen relativ, also abhängig von Inertialsystem, aber die Relativität der Zeit hat ihre Grenzen. Die zeitliche Reihenfolge von Ereignissen, die in einem kausalen Zusammenhang stehen können, das heißt, die durch eine Wirkung oder ein Signal verbunden sein können, dessen Ausbreitungsgeschwindigkeit die Lichtgeschwindigkeit c nicht überschreitet, ist vom Inertialsystem unabhängig. Auch in der Relativitätstheorie ist also die Wirkung später als die Ursache, die Geburt der Mutter früher als die ihrer Tochter. Insbesondere sind Interventionsparadoxa wie die Verhinderung der eigenen Geburt durch Beeinflussung eines Vorfahren ausgeschlossen.

Ob ein Ereignis E' von einem Ereignis E aus vergangen, gegenwärtig oder zukünftig ist, hängt allerdings wegen der engen Verschmelzung von Raum und Zeit nicht nur von den Zeitkoordinaten, sondern auch von den Raumkoordinaten von E und E' ab.

Die Verhältnisse sind in Abb. 1 veranschaulicht:

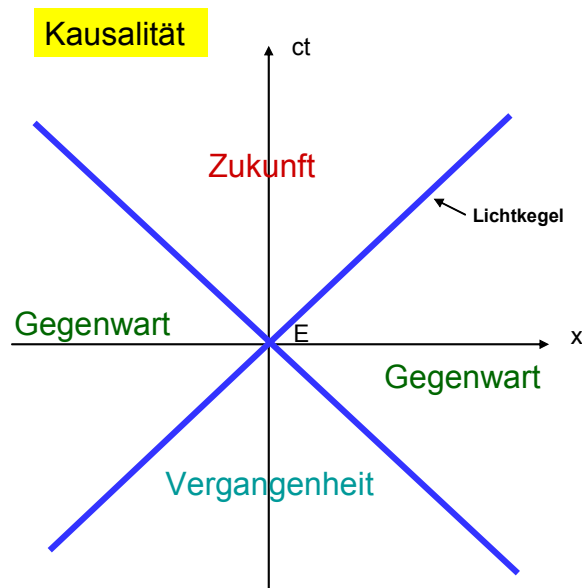


Abb.1: Die zeitliche Reihenfolge kausal verbundener Ereignisse ist unabhängig vom Bezugssystem.

Zukünftig zu E sind alle Ereignisse, die (wenigstens im Prinzip) von E aus beeinflusst werden können, vergangen alle Ereignisse, die auf E eingewirkt haben könnten und gegenwärtig alle Ereignisse, für die weder das eine noch das andere der Fall ist. In derselben Weise ließen sich Vergangenheit Gegenwart und Zukunft auch in der Newtonschen Mechanik definieren, aber während dort die Gegenwart zu einer festen Zeit gehört, entspricht sie in der Speziellen Relativitätstheorie einem größeren Raum-Zeitbereich, der durch den so genannten *Lichtkegel* $x^2 = (ct)^2$ begrenzt wird.

In der Newtonschen Mechanik beschreibt man die Bewegung eines punktförmigen Körpers, indem man zu jedem Zeitpunkt seinen Ort angibt. In anderen Worten: Man gibt die Ortskoordinaten als Funktionen der Zeitkoordinaten an. Indem man Orts- und Zeitkoordinaten in einem rechtwinkligen Schema aufträgt, ergibt sich eine Kurve wie in Abb.2.

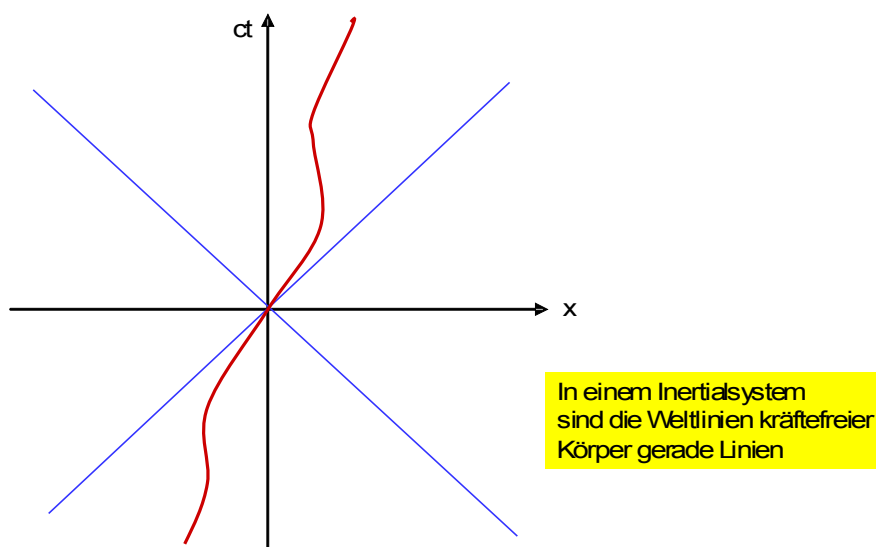


Abb.2: „Verräumlichung“ der Zeit, „Weltlinien“

(Hierbei habe wir alle Ortskoordinaten außer einer unterdrückt.) In der Relativitätstheorie ist eine solche Darstellungsweise der Bewegung, welche die Zeitkoordinate gegenüber den Ortskoordinaten bevorzugt, nicht angemessen. Vielmehr sollte man alle Koordinaten gleich behandeln und die Kurve in Abb.2 anders interpretieren, nämlich als die Gesamtheit der Punkte des Raum-Zeit-Kontinuums, die von dem Körper eingenommen werden. In dieser Deutung heißt die Kurve, die dem bewegten Körper in Abb.2 zugeordnet wird, seine *Weltlinie*. In der Kurve von Abb.2, ebenso wie in ihrer Deutung als Weltlinie ist keinerlei Unterschied in der Behandlung der Raum- und Zeitkoordinaten enthalten. Die Bewegung wird durch eine räumliche Kurve in einem räumlich aufgefassten Raum-Zeit-Kontinuum beschrieben. Dies ist gerade die oben erwähnte Verräumlichung der Zeit im Formalismus der Relativitätstheorie.

3. Innere und äußere Zeit

Die physikalische Darstellung einer Bewegung durch eine räumliche Weltlinie entspricht in keiner Weise der Art, in der wir Bewegung erleben, nämlich im Nacheinander wie in einem Film und nicht etwa in der Simultaneität eines Panoramabildes.

Diese Diskrepanz verstehen wir nur, wenn wir bedenken, dass uns Zeit nicht nur in der Außenwelt begegnet sondern mindestens ebenso sehr in uns. Diese innere Zeit tritt umso deutlicher hervor, je mehr wir alle äußeren Wahrnehmungen abschalten und den Blick nach innen richten. In seiner zugespitzt treffenden Art sagt der amerikanische Physiknobelpreisträger Richard Feynman. „*Zeit ist was passiert, wenn nichts mehr passiert.*“

Das Erlebnis dieser inneren Zeit ist schwer zu beschreiben, sicher ist es mit einem Gefühl des Fließens verbunden, das von der Vergangenheit in die Zukunft gerichtet ist. Es gibt eine ausgezeichnete Erlebnisqualität des „Jetzt“, der Gegenwart, die in die Zukunft fließt und dabei Vergangenheit hinterlässt. Gerold Prauss gebraucht das Bild eines bewegten Punktes, der mit seiner Bewegung eine Linie zieht. Der englische Philosoph Mc Taggart hat für eine Zeit, die wie die innere Zeit ein ausgezeichnetes Jetzt kennt und in die Zukunft gerichtet ist, die Bezeichnung „*A-Zeit*“ geprägt. Im Gegensatz zur A-Zeit ist die äußere Zeit der Physik eine verräumlichte Skalenzeit, bei der alle Punkte auf einer Zeitachse gleichberechtigt sind, ohne dass es einen ausgezeichneten Zeitpunkt „Jetzt“ gäbe. Mc Taggart nennt eine solche Zeit „*B-Zeit*“. Eine Zeitrichtung ist mit einer B-Zeit nicht notwendig verbunden.

Das Erleben einer Bewegung ist durch die innere A-Zeit geprägt: Das Fenster des Jetzt, in dem der bewegte Körper jeweils eine andere Lage hat, schiebt sich voran in die Zukunft, die früheren Lagen des Körpers können als Vergangenheit in Erinnerung gerufen werden. Dass unser Erleben durch die A-Zeit geformt ist, dass Bewegung sich uns als ein zeitliches Nacheinander und nicht als räumliches Zugleich darbietet ist die wesentliche Bestimmungsweise unserer menschlichen Existenz als bewusste Individuen. Die wesentliche Zeitlichkeit unserer Existenz ist in der philosophischen Tradition oft beschrieben und analysiert worden, besonders eindringlich etwa von Augustinus und Heidegger. Die Bewegung des Jetzt in die Zukunft erhält bei Heidegger ihren Antrieb nicht durch einen Druck aus der Vergangenheit, sondern durch einen Sog aus der Zukunft in einer Existenzweise der Sorge, die ihren letzten Ernst aus dem Tod erhält.

Bei Kant sind Raum und Zeit nicht mögliche Gegenstände irgendeiner Anschauung sondern im menschlichen Erkenntnisvermögen a priori gegebene Formen der Anschauung, und zwar der Raum als Form des äußeren und die Zeit als Form des Inneren Sinnes. Kant glaubte, daraus weiter schließen zu können dass der Newtonsche absolute Euklidische Raum und die absolute Zeit ebenfalls apriorischer Natur seien. Aus heutiger Sicht ist er damit sicher über das Ziel hinausgeschossen, was aber ganz verständlich ist, da zu seiner Zeit eine Alternative zum Euklidischen Raum nicht bekannt war, ja nicht einmal denkbar erschien, und da die Newtonsche Vorstellung von der absoluten Zeit für immer festzustehen schien. In Wahrheit liegt der apriorische Kern von Raum und Zeit für das menschliche Erkennen wohl tiefer und ist allge-

meiner in Begriffen wie Räumlichkeit, Zeitlichkeit, Ausgedehtheit, Lage und Bewegung zu fassen.

Ganz in Übereinstimmung mit der Auffassung des Raumes als Form des äußeren Sinnes, lässt sich der Gegenstandsbereich der Physik als der Teil der Welt umreißen, auf den räumliche Bestimmungen anwendbar sind.

Die Einsteinsche Relativität der Zeit ist nach den soeben Gesagten nicht so überraschend:

Die erlebte Spanne der A-Zeit hängt in mannigfacher Weise vom erlebenden Individuum ab, für die physikalische B-Zeit der Speziellen Relativitätstheorie bleibt hiervon nur die Abhängigkeit vom relativen Bewegungszustand der Beobachter übrig.

Die Bestimmungen von Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft aus dem vorigen Abschnitt passen ebenso gut zu unserer Vorstellung von der A-Zeit wie die Beobachterunabhängigkeit der zeitlichen Reihenfolge (nicht aber des zeitlichen Abstandes) kausal verknüpfbarer Ereignisse. Unsere Beobachtung, dass die Darstellung von Zeit und Bewegung in der Relativitätstheorie sich durch ihre Verräumlichung von der erlebten Zeit und der erlebten Bewegung unterscheiden, findet im Rahmen der Kantischen Philosophie eine einfache Erklärung. Der Bereich der Physik ist die äußere Welt, die Gegenstand des äußeren Sinnes ist.

Da Raum die Form des äußeren Sinnes ist, wird auch die Beschreibung von zeitlichen Vorgängen in der äußeren Welt räumlichen Charakter haben müssen.

Die Andersartigkeit der inneren A-Zeit zeigt sich erst wirklich beim Blick nach innen. In unserem Erleben bietet sich uns Welt, wie gesagt eher wie ein Film als wie ein Gemälde dar.

Feynman sagt hierzu: „*Zeit gibt es, damit nicht alles zugleich da ist.*“

4. Allgemeine Relativitätstheorie

Die Allgemeine Relativitätstheorie wurde von Albert Einstein in zehnjähriger Arbeit mit dem Ziel entwickelt, die Schwerkraft in die Spezielle Relativitätstheorie einzubeziehen. Dies erwies sich als unerwartet schwierig, und als das Ergebnis im Jahre 1915 endlich vorlag, bestand es in einer wesentlichen Erweiterung der Speziellen Relativitätstheorie und einer weiteren Revision der Vorstellungen von Raum und Zeit.

Die Schwerkraft ist durch ihre Universalität ausgezeichnet: Sie wirkt auf alle punktförmigen Körper gleich und hängt nur von deren träger Masse ab, zu der sie strikt proportional ist. Wegen dieser so genannten Gleichheit von träger und schwerer Masse sind die Bahnen aller punktförmigen Körper im äußeren Schwerfeld gleich, unabhängig von ihrer Masse. Ihre Universalität ist übrigens auch der Grund dafür, dass Schwerkraft nicht abgeschirmt oder abgeschaltet werden können, so wünschenswert die bisweilen auch wäre. Dieselbe Universalität wie die Schwerkraft weisen nur noch die so genannten Trägheitskräfte auf, die in beschleunigten Bezugssystemen auftreten, etwa die Kraft die uns in einem beschleunigten Auto in die Sitze zurückdrückt oder bei der Fahrt durch eine Kurve nach außen zieht. Diese Übereinstimmung führte Einstein zu der Vermutung, dass Trägheits- und Schwerkraft wesensverwandt seien. Dies ist der Kern des Einsteinschen *Äquivalenzprinzips*, das sich Einstein in einem Gedankenexperiment der folgenden Art verdeutlichte (vergl. Abb.3)¹:

Ein Beobachter in einer fensterlosen nach außen abgeschlossenen Kabine kann nicht feststellen, ob die Kabine im homogenen Schwerfeld der Erde ruhend aufgehängt ist oder im Weltall durch einen Raketenantrieb gleichförmig beschleunigt wird. Ebenso wenig kann er unterscheiden, ob die Kabine im Schwerfeld der Erde hinabfällt oder sich frei und ohne Antrieb im Weltall bewegt. Schwerkraft können also durch beschleunigte Bezugssysteme erzeugt oder zum Verschwinden gebracht werden, insbesondere herrschen in Systemen die in einem Schwerfeld fallen lokal, das heißt in räumlichen Dimensionen und Zeitspannen, in denen das Schwerfeld als konstant angesehen werden kann, die Gesetze der Speziellen Relativitätstheorie. An diesem Äquivalenzprinzip hielt Einstein unbeirrbar fest, und es war der Leitstern, der

¹ Entnommen aus Claus Kiefer: Gravitation, Fischer Taschenbuch Frankfurt 2003

ihn durch alle begrifflichen und mathematischen Schwierigkeiten hindurch zu seiner Allgemeinen Relativitätstheorie führte. Dass ihm bei seiner späteren Arbeit an einer allgemeinen Feldtheorie ein solcher Kompass fehlte, ist sicher ein Hauptgrund für den Misserfolg im wichtigsten Anliegen seiner zweiten Lebenshälfte.

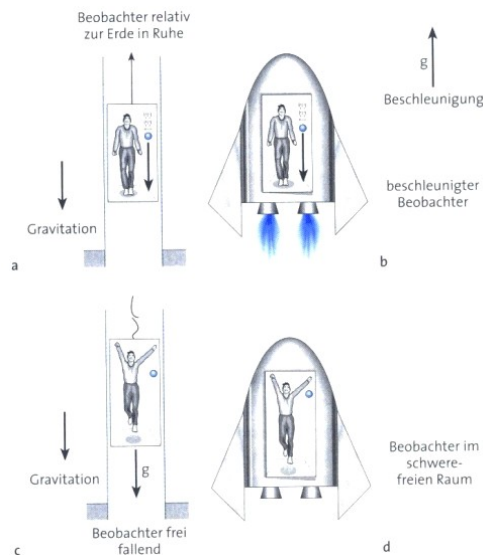


Abb.3: Das Äquivalenzprinzip

Im der Allgemeinen Relativitätstheorie haben Raum und Zeit eine Struktur, die eine bemerkenswerte Verallgemeinerung der Speziellen Relativitätstheorie darstellt. Da Schwerkkräfte immer vorhanden und niemals abschirmbar sind, gibt es Inertialsysteme, die in der Speziellen Relativitätstheorie so fundamental sind, genau genommen gar nicht: Es gibt gar kein Bezugssystem, in dem sich alle Körper, auf die nur Schwerkkräfte wirken, geradlinig und gleichförmig bewegen. Wohl aber gibt es zu jedem Punkt P der Raum-Zeit *lokale Inertialsysteme*, nämlich die in einem Gravitationsfeld frei fallenden Bezugssysteme, in denen lokal, das heißt in genügender räumlicher und zeitlicher Nähe des Punktes P , die Gesetze der Speziellen Relativitätstheorie gelten, zu denen die geradlinig gleichförmige Bewegung eines sich selbst überlassenen Körpers gehört. Zu verschiedenen Punkten P gehören verschiedene lokale Inertialsysteme, so dass Gravitationskräfte nicht vollständig, sondern nur in der Nähe eines jeden Punktes P durch ein mitfallendes Koordinatensystem zum Verschwinden gebracht werden können. Das Schwerfeld der Sonne etwa kann, natürlich, nicht als ganzes in irgend einem Koordinatensystem „forttransformiert“ werden, sondern lokal nur in der Umgebung eines jeden Raum-Zeitpunktes. In der Allgemeinen Relativitätstheorie, ist die Struktur von Raum und Zeit, durch die das gegenseitige Verhältnis aller lokalen Inertialsysteme geregelt wird, eine so genannte *Lorentz-Mannigfaltigkeit*. Zur Veranschaulichung dieses Begriffes betrachten wir ein vereinfachtes Modell genauer: Wir ersetzen die vierdimensionale Lorentz-Mannigfaltigkeit der Raum-Zeit durch die zweidimensionale Mannigfaltigkeit einer Kugeloberfläche. (vergl. Abb. 4)

An diesem Beispiel interessiert uns nicht, dass man die Kugeloberfläche in den dreidimensionalen Euklidischen Raum einbetten kann, wir konzentrieren uns nur auf die inneren Maßverhältnisse, also auf Abstände und Winkel, die längs der Kugeloberfläche gemessen werden. Man entnimmt Abb.4:

- In kleinen Bereichen, deren Durchmesser sehr viel kleiner als der Kugelumfang ist, besteht nur ein sehr geringer Unterschied zu den Maßverhältnissen der flachen zweidi-

mensionalen Euklidischen Ebene, die uns aus der Elementargeometrie bekannt ist. Diese kleinen Bereiche entsprechen den Gültigkeitsbereichen lokaler Inertialsysteme.

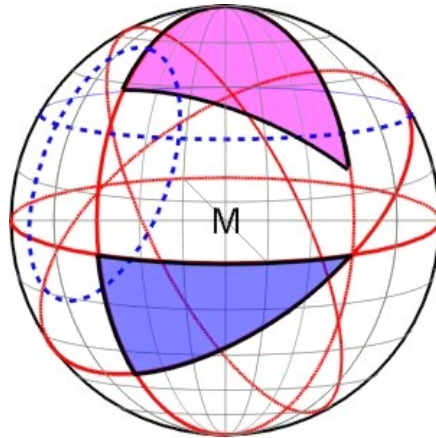


Abb.4: Ein Beispiel für einen nicht flachen Raum

- Es gibt auf der Kugeloberfläche keine Geraden wie in der Euklidischen Geometrie. Die kürzeste Verbindung längs der Kugeloberfläche zwischen zwei Punkten ist durch einen Abschnitt eines „Großkreises“ auf der Kugeloberfläche gegeben. Im allgemeineren Zusammenhang heißen die kürzesten Verbindungslinien „Geodäten“. Nur in Euklidischen Raum sind die Geodäten Geraden. In Abb. 4 sind die durchgezogenen Linien Geodäten, die gestrichelten Linien sind keine Geodäten.
- Im Kleinen gelten für ein Dreieck aus Geodäten die Gesetze der Euklidischen Geometrie, Unterschiede machen sich erst für große Dreiecke bemerkbar, insbesondere ist die Winkelsumme in einem Dreieck auf der Kugeloberfläche größer als 180 Grad. Für die Erdoberfläche hat es Jahrtausende gebraucht, bis die Menschen bemerkten, dass sie nicht flach, sondern gekrümmt ist. Die Abweichung der Winkelsumme von 180 Grad, geteilt durch die Fläche eines Dreiecks ist ein Maß für die Krümmung der Kugeloberfläche.

Übertragen auf die Maßverhältnisse von Raum und Zeit in der Allgemeinen Relativitätstheorie, lässt sich aus diesem Beispiel entnehmen:

- Die Raum-Zeit ist eine vierdimensionale Mannigfaltigkeit, deren Maßverhältnisse durch eine Größe g_{ij} bestimmt werden, die metrischer Tensor genannt wird. Im Kleinen stimmen die Maßverhältnisse mit des „flachen“ Raum-Zeitkontinuums der Speziellen Relativitätstheorie überein.
- Die Weltlinien von Teilchen, auf die nur Schwerkraft wirkt, sind keine Geraden, sondern Geodäten bezüglich der durch g_{ij} beschriebenen Metrik der Raum-Zeit. Nur über kurze Stücke unterscheiden sich diese Geodäten wenig von Geraden.
- Im Großen oder für sehr genaue Messungen beschreibt g_{ij} Krümmungseffekte der Raum-Zeit, also Abweichungen von der Flachheit.

Dass die Maßverhältnisse von Raum und Zeit nicht durch eine flache Geometrie gegeben sind, sondern, analog zu einer Kugeloberfläche, den Gesetzen einer Geometrie mit Krümmung gehorchen, ist die höchst überraschende und tief sinnige Hauptaussage der Allgemeinen Relativitätstheorie. Auf die Frage seines Sohnes Eduard, was er denn entdeckt habe, soll Einstein geantwortet haben: „Wenn ein blinder Käfer an einem gekrümmten Ast entlang kriecht,

merkt er nicht, dass der Ast gekrümmt ist. Ich hatte das Glück, zu bemerken, was der Käfer nicht bemerkt hat.“ Die Entdeckung, dass die Raum-Zeit nicht flach ist, hat dem Menschen eine neue Sicht der Welt eröffnet, ähnlich wie die Erkenntnis, dass die Erdoberfläche nicht flach ist.

Noch eine weitere grundlegende Einsicht folgt aus der Allgemeinen Relativitätstheorie: Das Raum-Zeitkontinuum der Speziellen Relativitätstheorie ist ähnlich starr und durch nichts beeinflussbar wie Raum und Zeit jeweils für sich in der Newtonschen Theorie. In der Allgemeinen Relativitätstheorie werden die Maßverhältnisse von Raum und Zeit durch die Anwesenheit von Materie beeinflusst. So ist die Weltlinie der Erde bei ihrer Bewegung um die Sonne gerade eine Geodäte in einer Raum-Zeit, deren Maßverhältnisse, bestimmt durch den metrischen Tensor g_{ij} , durch die Sonne gerade so verändert werden, dass diese Weltlinie keine Gerade ist, sondern die Sonne räumlich umläuft.

Genauer werden die Verhältnisse durch die *Einsteinschen Feldgleichungen* bestimmt:

$$R_{ij} - \frac{1}{2} g_{ij} R - \Lambda g_{ij} = \frac{8\pi\kappa}{c^4} T_{ij}$$

Hierbei sind R_{ij} und R Größen, die aus dem metrischen Tensor g_{ij} berechnet werden und die Krümmung der Raum-Zeit beschreiben; sie verschwinden für die flache Raum-Zeit der Speziellen Relativitätstheorie. Λ ist die so genannte Kosmologische Konstante, die zuerst von Einstein eingeführt, später von ihm verworfen wurde, und die durch neuere Ergebnisse der Kosmologie in jüngster Zeit ihre Auferstehung erlebt hat. T_{ij} ist der Energie-Impulstensor, der die Dichte und Strömung von Energie und Impuls der Materie beschreibt.

Man sieht die gegenseitige Beeinflussung von Raum-Zeit und Materie: Die Verteilung der Materie beeinflusst die Maßverhältnisse von Raum und Zeit, die ihrerseits die Bewegung der Materie bestimmen.

Raum und Zeit sind nicht mehr nur die Bühne des physikalischen Geschehens, sondern nehmen am physikalischen Geschehen teil: Die Bühne wird zum Akteur. In der Sprache der Kantischen Philosophie können wir sagen: Raum und Zeit der Allgemeinen Relativitätstheorie *sind* nicht nur Formen der Anschauung, sondern physikalische Objekte, die eine Form *haben*, und zwar die räumliche Form einer Lorentz-Mannigfaltigkeit.

Die Allgemeine Relativitätstheorie ist in vielfachen, überraschenden Vorhersagen bestens und im Detail bestätigt. Es gibt keinen experimentellen Befund, der im Widerspruch zur Allgemeinen Relativitätstheorie steht. Einige besonders wichtige Aussagen der Allgemeinen Relativitätstheorie seien hier angeführt:

- Gangunterschiede von Uhren im Gravitationsfeld: Uhren gehen auf höherem Gravitationspotential schneller. Dieser Effekt ist bestens bestätigt. Er wird, ebenso wie die Zeitdehnung der Speziellen Relativitätstheorie im Positionsbestimmungssystem GPS, das z.B. millionenfach in Automobilen eingebaut ist, routinemäßig einbezogen. Seine Vernachlässigung würde zu einer Fehlbestimmung des Ortes um viele hundert Meter führen.
- In der Himmelsmechanik ergeben sich Korrekturen zur Newtonschen Theorie. Man findet beispielsweise eine kleine zusätzliche Drehung des Perihels der Merkurbahn. Deren quantitativ richtige Berechnung war der erste konkrete Erfolg der Allgemeinen Relativitätstheorie. Inzwischen gibt es weit genauere Bestätigung durch Radarmessungen im Sonnensystem. Die Effekte sind deutlicher und in allen Einzelheiten bestätigt an so genannten Doppelpulsaren, eng gebunden astronomischen Systemen aus zwei sehr massereichen und dichten Komponenten.
- Die Ablenkung von Sternenlicht im Schwerefeld der Sonne war eine weitere frühe Vorhersage der Allgemeinen Relativitätstheorie. Ihre Bestätigung durch Messungen bei der Sonnenfinsternis von 1919 begründete mit einem Schlag den andauernden

Weltruhm Einsteins. Auch hier gibt es heute genauere Bestätigungen aus der Messung von Bedeckungen von Quasaren durch die Sonne und wieder aus Radarmessungen im Sonnensystem.

- Gravitationsstrahlung, die Abstrahlung von Energie durch Schwerewellen, ist durch Beobachtung an den bereits erwähnten Doppelpulsaren indirekt bestätigt. An ihren direkten Nachweis wird gearbeitet.
- Handelte es sich bei den bisherigen Effekten eher um relativ kleine Korrekturen zur Newtonschen Gravitationstheorie, so ist die Allgemeine Relativitätstheorie in der Theorie der Schwarzen Löcher voll und ganz bei sich zu Hause. Schwarze Löcher sind hoch verdichtete Gebilde, deren Gravitationsanziehung so stark ist, dass nichts, nicht einmal Licht aus ihrem Inneren entweichen kann. Sie entstehen beim Kollaps eines Sterns von mehr als dreifacher Sonnenmasse, wenn dessen Energiequellen im Inneren erschöpft sind und der Strahlungsdruck der Schwerkraft nicht mehr widerstehen kann, und sie können sich vergrößern, indem sie weitere Masse aus ihrer Umgebung einsaugen. V404 Cygni ist ein beobachtetes Beispiel, und vor kurzem wurde ein schwarzes Loch von millionenfacher Sonnenmasse im Zentrum unserer Milchstraße nachgewiesen.
- Schließlich ist die Kosmologie ein besonders eindrucksvolles und erfolgreiches Anwendungsgebiet der Allgemeinen Relativitätstheorie, auf das wir zum Schluss dieses Abschnittes kurz eingehen wollen.

Die Einsteinschen Gleichungen sind auch auf das Universum als ganzes anwendbar. Übersichtliche Ergebnisse erhält man unter der Annahme des *kosmologischen Prinzips*:

Wenn man über alle „kleinräumigen“ Strukturen bis zur Größenordnung von etwa einhundert Millionen Lichtjahren mittelt, dann hat das Weltall überall dieselbe Gestalt, und es ist keine Richtung im Raum ausgezeichnet. Das kosmologische Prinzip ist u.a. durch Beobachtungen an der kosmischen Hintergrundstrahlung gut gesichert. Unter dieser Annahme ergibt sich aus der Lösung der Einsteinschen Feldgleichung:

1. Es gibt eine ausgezeichnete Zeikoordinate, die Weltzeit. Zu jedem festen Wert der Weltzeit ist der sich dadurch ergebende räumliche Schnitt der Raumzeit immer einer und derselbe von drei möglichen Typen: entweder konstant positiv gekrümmt wie die dreidimensionale Oberfläche einer vierdimensionalen Kugel oder konstant negativ gekrümmt wie ein dreidimensionaler Sattel oder aber, als Grenzfall zwischen beiden Typen flach und Euklidisch.
2. Es gibt keine stabile Lösung der Einsteinschen Gleichungen, für die die räumliche Metrik statisch, d.h. für jeden Wert der Weltzeit dieselbe ist. Vielmehr muss sich das Weltall entweder in sich zusammenziehen oder ausdehnen, was bedeutet, dass sich im Mittel astronomische Objekte wie etwa Galaxien entweder alle einander annähern oder sich voneinander entfernen, und zwar umso schneller, je weiter sie auseinander liegen. (Für positive kosmologische Konstante gibt es eine instabile statische Lösung; das ist der Grund, aus dem Einstein zunächst eine kosmologische Konstante annahm.)

Seit den zwanziger Jahren weiß man, dass sich das Weltall in sich räumlich ausdehnt, die Beobachtungen der letzten Jahre machen es sehr wahrscheinlich, dass die räumliche Metrik in der Nähe des flachen Grenzfalles liegt und dass die Expansion beschleunigt ist. Das ist nur mit einem positiven Wert der kosmologischen Konstante möglich. Weiter gilt es als sicher, dass nicht mehr als 20% der Materie in der uns bekannten Form von Sternen, Planeten, Staub und Gas vorliegen, mindestens 80% sind „*dunkle Materie*“ einer bisher unbekanntem Art. Normale und dunkle Materie zusammen machen nur etwa 30% der Gesamtenergie des Weltalls aus, der Rest stammt aus der kosmologischen Konstanten oder von einer weiteren unbekanntem Form von Materie, die eine kosmologische Konstante simuliert und gegenwärtig unter dem Namen „*dunkle Energie*“ diskutiert wird. Rechnet man die Expansion des Weltalters zurück, so ergibt sich zwingend, dass sich vor ungefähr 13,5 Milliarden Jahren das Weltall in

einen „*big bang*“ -Zustand unvorstellbare hoher Temperatur und Dichte befunden haben muss. Dieses bestürzende Erkenntnis hat denselben Grad von Sicherheit wie die Existenz von Dinosauriern vor hundert Millionen Jahren, auf die man aus Fossilien schließt. Der „*big bang*“ hat seine Spuren in der kosmischen Hintergrundstrahlung hinterlassen, man kann heute bereits der Geschichte des Universums in Einzelheiten verstehen, etwa die Ausbildung seiner feineren Strukturen und die Häufigkeitsverteilung der chemischen Elemente.

5. Das Verschwinden der physikalischen Zeit

Die Allgemeine Relativitätstheorie, zu der wir am Ende unsere Streifzuges durch die Gedanken Einsteins gelangt sind, wird von vielen als die schönste aller physikalischen Theorien angesehen, und sie ist sicher die Krönung und Vollendung der klassischen Physik, deren Welt-sicht zutiefst mit der Einsteins übereinstimmte:

Die Welt wird aus der Außenperspektive eines allwissenden Gottes gesehen, alles Geschehen ist durch das Gesetz universeller Kausalität strikt geordnet und notwendig. Dem Beobachter, der den Zustand der Welt und ihre Gesetze konstatiert, kommt nur eine registrierende, allen-falls bewundernde Rolle zu.

Im Gegensatz dazu ist die Weltperspektive der Quantenphysik die Sicht eines Beobachters, der nicht nur Teil der Welt ist, sondern durch seine Beobachtung aktiv in den Zustand der Welt eingreift. Damit verbunden, ist der Ausgang seiner Beobachtungen oder Messungen nicht durch irgendeinen Zug der Welt strikt determiniert, sondern enthält ein wesentliches und unvermeidliches Element des Zufalls. Einstein hat die Weltsicht der Quantenphysik niemals akzeptiert. Bekannt ist sei Diktum „Gott würfeln nicht“. Er war überzeugt, dass die Zufälligkeit in der Quantenphysik nur auf unvollständiger Kenntnis des wahren physikalischen Zu-standes beruhe und dass eine vollständige Naturbeschreibung die Züge der klassischen Physik tragen müsse. Heute, in Kenntnis der Überlegungen zu den Bellschen Ungleichungen, muss diese Annahme als widerlegt und eine Rückkehr zur klassischen Physik als ausgeschlossen gelten.

Bemerkenswert ist, dass es bis heute nicht gelungen ist, die Allgemeine Relativitätstheorie und die Quantentheorie zu einer überzeugenden Synthese zu bringen. Es ist, als ob die unver-einbaren Genien von Bohr und Einstein ihren Disput in dieser Form weiterführten.

Wenn man die Entwicklung der Vorstellung von der physikalischen Zeit von der Newton-schen Theorie bis zur Allgemeinen Relativitätstheorie verfolgt, dann wird man eine Tendenz zunehmender Verräumlichung wahrnehmen. Schon die Newtonsche Zeit ist, im Gegensatz zur inneren A-Zeit, eine Skalenzeit vom B-Typ, bei der es, wie auf einer räumlichen Geraden, keinen ausgezeichneten Punkt und keine bevorzugte Richtung gibt. Wir haben Gründe für die Notwendigkeit der Verräumlichung der Zeit bei ihrer Verlegung nach außen angegeben.

Die Verräumlichung setzt sich in der Speziellen Relativitätstheorie fort, in der durch das Ge-setz der Lorentz-Transformation räumliche und zeitliche Koordinaten noch enger miteinander verbunden werden und Raum und Zeit ihre getrennte Absolutheit einbüßen.

In der Allgemeinen Relativitätstheorie hat die zeitliche Koordinate von einem prinzipiellen Standpunkt aus noch mehr den Charakter der Beliebigkeit, und Raum und Zeit sind im Be-griff der Welt als Lorentz-Mannigfaltigkeit völlig miteinander verschmolzen, und zwar unter dem Vorzeichen der Räumlichkeit. Alles Geschehen liegt simultan und zeitlos in der Form eines „Blockuniversums“ als Ansammlung von Weltlinien in der Lorentz-Mannigfaltigkeit vor.

In der Quantentheorie setzt sich der Bedeutungsverlust der Zeit fort bis hin zu ihrem völligen Verschwinden. Die Tatsache, dass in der Allgemeinen Relativitätstheorie keine natürliche von der Lösung der Einsteinschen Feldgleichungen unabhängige Zeitkoordinate existiert, hat radi-kale Konsequenzen beim Versuch einer Quantisierung der Raum-Zeit Metrik. So ist beispie-lsweise die so genannte *Wheeler-de Witt Gleichung* der Quantengravitation vollständig zeitlos.

Nur gewisse Lösungen erlauben es, im Nachhinein und näherungsweise so etwas wie Zeit zu identifizieren. Die Zeit verliert in diesem Rahmen ihren universellen fundamentalen Charakter und wird zu einer abgeleiteten Größe von beschränkter Anwendbarkeit.

Den Bedeutungsverlust von Zeit im Vergleich zur reichen, gefühlsgesättigten inneren A-Zeit hat Einstein sehr deutlich empfunden. Kurz vor seinem Tod schrieb er in einem Beileidsbrief an die Witwe seines soeben verstorbenen Freundes Michele Besso:

„Für uns gläubige Physiker hat die Scheidung zwischen Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft nur die Bedeutung einer, wenn auch hartnäckigen, Illusion.“

Das ist aus der gottgleichen Weltspektive der klassischen Physik und unter dem Eindruck des zeitlosen Blockuniversums der Allgemeinen Relativitätstheorie gesagt. Wenn der verräumlichten, verblässenden physikalischen Zeit die Priorität eingeräumt wird, dann bleibt für die innere A-Zeit nur der Rang einer Illusion.

Die Quantentheorie nimmt die konstitutive Rolle eines bewussten Beobachters ernster, der, wenn er ein Mensch ist, in seiner Existenzweise durch die A-Zeit bestimmt ist.

Sehr oft empfindet allerdings auch der Mensch die Zeitgebundenheit seiner Existenz als Beschränkung. Seine Bemühung, sich im Denken der Zeitlosigkeit zu nähern, wie sie in der Philosophie, der Mathematik und eben auch im Verblässen der physikalischen Zeit in der fundamentalen Physik aufscheint, lässt sich vielleicht als ein Versuch verstehen, dieser Beschränkung ein Stück weit zu entrinnen.

Die wunderbare, befreiende Unbefangenheit Einsteins, die ihm eine tiefe Revision der Vorstellungen von Raum und Zeit erlaubte, sollte uns zu solchen Erwägungen Mut geben.