

Dierck-Ekkehard Liebscher

Eigenzeit und Weltalter

Im Folgenden wird versucht, einige seltener bedachte Aspekte des Begriffs Zeit aus der Sicht der Physik zu beleuchten. Das Vorgehen wird sich an die mit dem Namen *Ernst Machs* verbundene Analyse der *Newtonschen* Mechanik anlehnen, die im Werk *Hans-Jürgen Treder*s eine große Rolle gespielt hat.

1 Kalender

Zum Thema Zeit gibt es so viel Literatur, dass es immer etwas naseweis ist zu glauben, man könne etwas Eigenes hinzufügen. Ich kann hier also nur Kommentare beitragen, die unter diesem Gesichtswinkel sicher nicht wirklich originell sind, aber immerhin den physikalischen Inhalt unterstreichen. Ich glaube, sie atmen den Geist meines verehrten Lehrers *Hans-Jürgen Treder* (1928–2006), dessen 90. Geburtstag Anlass unserer heutigen Zusammenkunft ist.

Die weitläufige und hauptsächlich auf das subjektive Erleben konzentrierte Literatur soll weder zitiert noch bewertet werden. Vielmehr soll es um die Fragen gehen, die nicht von unseren Empfindungen abhängen. Deshalb müssen alle Fragen des subjektiven Erlebens ausgeblendet werden.¹ Das subjektive Zeitgefühl ist jedoch so omnipräsent, dass es eines Modells bedarf, an dem der Zeitbegriff von außen betrachtet werden kann. Wenn das gelingt, wird sich zeigen, dass sich der Begriff der Zeit als Struktur in den Anordnungen von Zuständen verschiedener Systeme entwickelt. Wir beginnen mit einer Begründung, weshalb die Zeitordnung unabhängig vom subjektiven Erleben in der Natur vorgebildet ist.

1 Fast alle Aussagen über die Zeit sind metaphorisch und klammern sich an Begriffe, die ihrerseits ohne den Begriff Zeit nicht definierbar sind. Nicht einmal *Leibnizens* Zitat „Die Zeit ist das Maß der Bewegung“ ist ohne Zirkel: Bewegung ist nicht definiert ohne vorherige Kenntnis, was Zeit ist. Der erste dieser abhängigen Begriffe ist der des Prozesses, und oft sind die Assoziationen zum Begriff Prozess hilfreich und entmystifizierend.

Das Modell der Wahl ist ein Film, d.h. eine Folge von Zustandsprotokollen mit Zeitmarken, die nach diesen geordnet ist. Die Zeitmarken werden gelöscht. Dann entsteht eine ungeordnete Menge von Zustandsbeschreibungen. Zeit ist nicht zu sehen. Lässt sie sich rekonstruieren? Es wird ein Puzzlespiel, möchte man meinen. *Julian B. Barbour* (* 1937) hat dies genauer untersucht (vgl. Barbour 1999). Es bleibt aber ein komplexes Unterfangen, in diesem Puzzlespiel die Beobachtung zu finden, dass eines auch in einem beschränkten Teil des Puzzles möglich sein muss: Vergangenheit und Zukunft zu unterscheiden.

Diese Unterscheidung entsteht unmittelbar, wenn es Bibliotheken gibt,² in denen Teile der Bildfolge selbst wieder gespeichert sind (siehe Abbildung 1).

So entsteht eine zeitliche Ordnung in genau der Art, wie sie auch subjektiv empfunden wird.³ Der Stapel der Zustandsbeschreibungen wächst nun wie die Bibliothek unserer Erinnerungen, Kenntnisse, Fertigkeiten (vgl. auch Assmann 2012; Hörz 1989; Liebscher 2012; Zimmermann 2004, S. 554ff.).⁴ Physik ist an dieser Stelle noch nicht betroffen, aber es ist bereits zu sehen, dass in kleinen Bereichen des Stapels und kleinen Bildausschnitten die Richtung im Stapel, die Teilung in Vergangenheit und Zukunft, immer undeutlicher wird. In Systemen ohne Gedächtnis sollte man nichts dergleichen beobachten können. Zeit ist das Ergebnis von Gedächtnis der uns umgebenden Welt, unabhängig von unserem eigenen. Zeit ist nicht nur Einbildung, nicht nur eine reine Form der Anschauung, sondern eine reale Ordnung, zu der sich objektive Aussagen treffen lassen.

Die Physik kommt ins Spiel mit der Beobachtung des Alterns. Die auf den Einzelbildern sichtbaren Strukturen sind mal deutlicher, mal weniger deutlich, mal scharf, mal nur mit Phantasie zu erkennen. Viele dieser Strukturen ordnen sich nach abnehmender Deutlichkeit. So entsteht eine Art „Früher-war-alles-besser-Ordnung“ der Zustände als Vorform des Entropiesatzes.⁵ Allerdings findet sich unter geeigneten Bedingungen durchaus zuneh-

2 *Bibliothek* ist hier ein Oberbegriff für alles, was in den Zustandsprotokollen Information über andere Zustandsprotokolle enthält. Das einfachste Beispiel ist eine Fotowand, vor der die Gruppenfotos bei Familienfeiern aufgenommen werden, wobei diese Gruppenfotos jedes Mal wieder zu den alten Fotos an der Rückwand gesteckt werden.

3 Auch wenn die Bibliotheken nicht besser geordnet sind als der Vorraum des Grabes von *Tut-Ankh-Amun*, lassen sich die Bilder wie in einer Sedimentschichtung reihen.

4 Man kann die Zeit abschätzen, die das Gehirn für die Genese eines Bildes für das Gedächtnis benötigt: 30 bis 40 ms.

5 Dies wird auch als thermodynamischer Zeitpfeil apostrophiert. Die Elektrodynamik hält einen Zeitpfeil im Fehlen avancierter Potenziale bereit (vgl. Zeh 1989), die Quantentheorie in den irreversiblen Veränderungen beim Messvorgang und die Kosmologie in der Expansion des Weltalls.

mende Deutlichkeit und Strukturierung sowohl im Irdischen als auch im Universum, dessen Geschichte gerade eine Geschichte der Strukturierung ist (vgl. Bojowald 2009; Ebeling et al. 1998; Liebscher 2005).⁶



Abbildung 1: Bibliotheken

Wenn die Zustandsbeschreibungen den Zustand einer Bibliothek enthalten, die ihrerseits Zustandsbeschreibungen enthält (oberer Teil), gibt es eine unbezweifelbare Anordnung der Zustände (unterer Teil).

Eigene Darstellung

⁶ In der Vortrags-Diskussion wurde nach der Bedeutung der Entropie für unser Problem gefragt. Zunächst ist die Entropie für Prozesse definiert. Als Zustandsfunktion bezieht sie sich auf eine Wahrscheinlichkeitsverteilung, die gerade die Mittelung eines vergangenen und noch weiter ablaufenden Prozesses ist. Die Vorstellung, eine gegebene Stichprobe dieser Verteilung, d.h. der mikroskopische Zustand zu einem bestimmten Zeitpunkt, habe eine solche Entropie, ist unzulässig.

Die verschiedenen Folgen von Formen, Lagen und Orientierungen werden nun zu Prozessen und Bewegungen. Zwischen den einzelnen Prozessen wird wiederum eine Struktur beobachtet, die hier Verzahnung genannt werden soll. Die in einer bestimmten Zeitspanne ablaufenden aufeinander abgestimmten (verzahnten) Prozesse bilden Bündel. Wegen dieser Verzahnung der einzelnen Prozesse gibt es eine ganze Auswahl von Kriterien, nach denen die Zustände eines Systems nummeriert werden können, d.h. die als Zeitmarkengeber in Frage kommen. Die Wahl eines speziellen Kriteriums beschränkt die Allgemeinheit nicht. Jede der Strukturen kann als Kalender benutzt werden. Erst jetzt erhebt sich die Frage, wie nützlich sie sind und welche Zeitspanne sie gut ordnen (siehe Abbildung 2). Es sind die darauf aufbauenden Beziehungsgleichungen, die entscheiden, welche Kriterien bzw. Zeitmarkengeber die produktivsten sind.

In diesen Kalendern findet sich nun die Verzahnung der Abläufe, die sich wiederholen können und deren teilweise Kenntnis bereits auf die gesamte Struktur des Ablaufs schließen lässt. Diese Erfahrung mündet in die

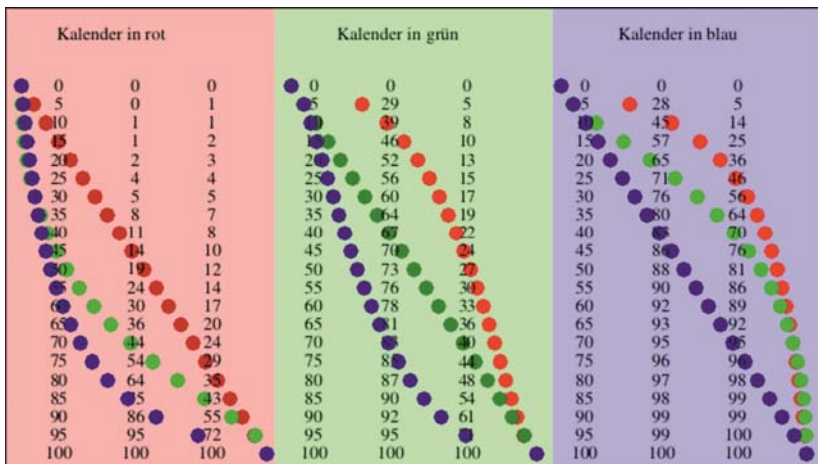


Abbildung 2: Kalender

Verschiedene Prozesse definieren verschiedene Kalender. Hier sind drei Prozesse mit ihren Parametern und den zugehörigen Kalendern gezeigt, in denen der definierende Prozess gleichförmig aussieht. Die Zeit ist in diesem Sinne ein virtueller Prozess, der besonders einfache Beschreibungen für die realen Prozesse erlaubt (pragmatische Wahl). Er ist deshalb durch das beobachtbare Prozessbündel bestimmt.

Eigene Darstellung

Entwicklungsgesetze der Bilder und die von ihnen erlaubte Prognose. Der Parameter, der die Beziehungen zwischen all den anderen in aktuell rechenbare Bewegungsgleichungen wandelt und damit Prognosen ermöglicht, ist das Zeitmaß der Wahl.

An dieser Stelle muss erwähnt werden, dass die Bewegungsgesetze sich in der physikalischen Analyse hierarchisch zu ordnen scheinen. Die aus dieser Sicht fundamentalen Bewegungsgesetze der Mechanik, Feldtheorie und Quantentheorie lassen vermuten, dass sie sich alle als Lösungen von Extremal-Problemen finden lassen. Dabei wird die explizite Trennung in Zukunft und Vergangenheit überflüssig und die betrachteten Systeme sind Objekte in der Raum-Zeit, also etwa „unbewegliche“ Weltlinien statt Massenpunkte. Am weitesten geht hier wohl die von *Barbour* angestoßene Entwicklung (vgl. Barbour 1999; Barbour et al. 2002, 2014). Wie zu erwarten ist, führt die Ausblendung der Vorgeschichte (Erinnerung) zu Problemen bei der Interpretation des Zeitverhaltens. *Es gibt keine Zeit ohne Erinnerung* wäre dafür eine Metapher.⁷ Dabei ist Zeiterlebnis nicht nur Stapeln von Erinnerungen, sondern auch Ableitung von Erwartungen (Prognosen). Die Wahrnehmung der Zeitdauer hängt davon ab, was in der Zeit passiert. Ein ereignisreicher Zeitraum erscheint kurz, „vergeht wie im Flug“. Hingegen dauern ereignisarme Zeiträume manchmal quälend lange. Von dieser Beobachtung leiten sich auch die Begriffe Kurzweil und Langeweile ab. Paradoxerweise empfindet man im Rückblick die Zeiten gerade umgekehrt: In ereignisreichen Zeiten hat man viele Informationen eingespeichert, so erscheint dieser Zeitraum lang. Umgekehrt erscheinen ereignisarme Zeiten im Rückblick kurz, da kaum Informationen über sie gespeichert sind.

Man gewinnt den Eindruck, dass bei der Betrachtung und der Präparation von Teilprozessen die Vergangenheit weggeschoben wird und damit neue Fragen zum Zeitlauf entstehen. So können die Grundgleichungen der Physik eine Zeitrichtung nicht mehr auszeichnen, ganz abgesehen vom Verständnis des quantenmechanischen Messprozesses (vgl. Bojowald 2009; Kiefer 2009). Der Betrachtung wert ist dazu das Anfangswertproblem der klassischen Mechanik: Die Vorgeschichte scheint ausgeschaltet, allerdings kann man die Vorgabe der Geschwindigkeiten als Einbeziehung einer wenn auch infinitesimalen Vorgeschichte ansehen.

7 Erinnerung ist hier die Metapher für die Spuren der Vorgeschichte und verführt wie alle Metaphern auch zu irreführenden Assoziationen: Hier ist hauptsächlich die Vorgeschichte der Natur gemeint, die sich allerdings abgeleitet auch im subjektiven Empfinden widerspiegelt.

Der elementar beobachtete Zeitablauf ist zunächst räumlich rein lokal. In der Kajüte unter Deck des von *Galileo Galilei* (1564–1642) zitierten Seglers bestimmt sich die Zeitfolge allein aus dem Ineinandergreifen der Bewegungen und Prozesse in der Kajüte. Diese Verzahnung, dieses Ineinandergreifen muss unabhängig von Lage und Orientierung der Kajüte in Zeit und Raum sein: Es wäre sonst schwierig, die Verzahnung überhaupt als gültigen Fakt zu finden.⁸ An Hand der Struktur dieses Ineinandergreifens kann nicht auf Ort, Zeit, Orientierung und Geschwindigkeit geschlossen werden. Das ist das Relativitätsprinzip. Unter Deck bezieht sich die Zeit zunächst nur auf die Prozesse unter Deck. Es ist deshalb eine besondere Frage, wie sich solche lokalen Zeiten, die in *Albert Einsteins* (1879–1955) Relativitätstheorie als Eigenzeit erscheinen, gegeneinander verhalten. Die grobe Erfahrung sagt, dass es kein Problem gibt und wir mit einer universellen Zeit rechnen können, der man ihre Herkunft als Gemeinschaft aller lokalen Zeiten nicht ansieht, und die *Isaac Newton* (1643–1727) verleitete, ihr einen absoluten (d.h. von der Herkunft losgelösten) Charakter zuzusprechen. Vielleicht hatte er aber die ihm überflüssig erscheinenden Diskussionen über den Charakter der Zeit satt und wollte einfach seine Ruhe haben. Die Prognosen seiner Gravitationstheorie fanden keinen Widerspruch zur Beobachtung, und darauf allein kommt es schließlich an.

2 Uhren

Zeitintervalle bedürfen eines Messwerts, wenn man an ihnen entlang rechnen will. Diese Messwerte bedürfen einer Uhr, an der man sie ablesen kann. Ohne Uhr laufen Prognose und Synchronisierung von Handlungen ins Leere.⁹

Gesucht wird ein gescheiter Zeitparameter, der die Bewegungsgleichungen besonders einfach macht. Natürlich startet man auch hier mit dem ersten *Newtonschen* Axiom: *Unbeeinflusste Körper treffen sich in Raum und Zeit höchstens ein einziges Mal*. Ihre Spuren in Raum und Zeit (die Weltlinien) sind deshalb Geraden und erlauben die Konstruktion von linearen

8 Nach der Diskussion noch provozierender formuliert: Ohne in der Natur und folglich auch in uns existierender Erinnerungstapel gibt es weder Zeit noch Zeitrichtung. Der Erinnerungstapel ermöglicht Rekonstruktion und Erkenntnis des Zusammenhangs zwischen den Prozessen, und er liefert einen Grund für die Brechung der Symmetrie von Vergangenheit und Zukunft, ohne auf die Bewegungsgleichungen vorgreifen zu müssen. Die Zeit erfordert Präsenz der Vergangenheit (vgl. Assmann 2012).

9 Die Astronomie ist die erste Wissenschaft mit eintreffenden Prognosen. Der Sternhimmel ist dabei seine eigene Uhr. Man beobachtet einen Kosmos am Himmel im Gegensatz zum Chaos auf der Erde.

Koordinaten, in denen sie als geradlinig und gleichförmig im üblichen Sinne erscheinen (vgl. Bachmann 1959; Liebscher 1999). Die Zeitkoordinate ist nun selbst bis auf lineare Umrechnungen festgelegt. Keine Zeitdefinition kommt mit so wenig Voraussetzung aus, allerdings liefert diese Definition allein kein praktisch brauchbares Maß für Zeitintervalle.

Die bezogen auf unseren Bilderstapel einfachste Uhr ist der radioaktive Zerfall. Die Radio-Carbon-Methode liefert ganz direkt eine Zeit für die „Früher-war-alles-besser-Ordnung“, ist aber eben für menschliche Zeitintervalle nicht genau genug.

Die periodische Schwingung um eine einfache Gleichgewichtslage, wie sie von einem harmonischen Oszillator modelliert wird, ist der Prozess der Wahl. Man kann einen periodisch schwingenden Mechanismus lokal konstruieren, aber er allein ist noch keine Uhr. Die Beobachtung zweier Elongationen sagt nichts über das dazwischenliegende Zeitintervall aus, wenn nicht dabei die Perioden selbst gezählt werden. Das Zählen produziert nun einen Teil des Erinnerungstapels, welcher der Zeit zugrunde liegt. Zählen ist Teil des Aufbaus einer Bibliothek. Auch die Ticks eines Chronometers müssen gezählt werden, damit das Chronometer wirklich eine Uhr ist.¹⁰

Gezählt werden können alle wiederkehrenden Ereignisse. Ob sie als Uhr geeignet sind, hängt von ihrer exakten oder mittleren Regelmäßigkeit ab. Neben den harmonischen Oszillatoren sind auch ideale Spiegelpaare denkbar, zwischen denen ein Signal wie ein Tennisball zwischen den Rackets der Spieler hin und her läuft (die im Folgenden behandelte Lichtuhr mit ihrer Konformzeit ist dafür ein Beispiel). Zählen wir die Stöße in einem idealen Gas und mitteln geeignet, findet sich die kinetische Zeit. Unter stationären Umständen sind das virtuell äquivalente Zeitmaße. Für ein expandierendes Universum sind sie allerdings verschieden, wie wir noch sehen werden.

Uhren müssen aneinander abgeglichen werden, auch mit ihresgleichen, wenn zu verschiedenen Zeiten gestellt wird: Je stabiler die Uhr, desto nützlicher ist sie.¹¹ Stabilität heißt dabei vor allem Unempfindlichkeit gegen alle

10 Der Stroboskop-Effekt führt uns vor Augen, dass eine unnummerierte und nicht durch Erinnerung markierte Bildersammlung keine Rekonstruktion der Zeit erlaubt.

Die oft beschworenen inneren Uhren der Lebewesen sind nur mehr oder weniger periodische Prozesse, die aber niemand zählt, und die uns kein Zeitgefühl vermitteln. Wer in einem dunklen Raum aufwacht, weiß nicht, wie spät es ist. Welcher Tag es ist, erkennt er an seinen Erinnerungen, und täuscht sich deshalb, wenn er mehrere Tage durchschlafen musste.

11 Uhren müssen immer wieder aufgezogen werden. Newton hielt es für möglich, dass Gott die Welt immer wieder auf den Anfangszustand zurückstellt, wenn das Universum aus dem Ruder läuft.

äußeren Einwirkungen, die die Verzahnung der lokalen Prozesse und den Gleichlauf der lokalen Uhren stören.

Das Zeitmaß entsteht so durch Vergleich verschiedener Prozesse, die am gleichen Ort unter den Augen des Beobachters stattfinden und immer auf die gleiche Weise und in gleichem Rhythmus ineinandergreifen (siehe Abbildung 2). Der Zeitlauf ist der verzahnte Ablauf im Prozessbündel selbst.

3 Eigenzeit

Die Lokalität der Zeit wird zu einer neuen Frage, wenn der Raum und die Bewegung in ihm betrachtet werden muss. Die Relativität bewirkt, dass die lokale Verzahnung der Prozesse (Uhren eingeschlossen) in einem Objekt unabhängig von Ort, Zeit, Geschwindigkeit und Orientierung sind. Im Raum haben die Objekte eine Geschichte, deren Spur ihre Weltlinie ist.

Die zur Messung herangezogenen Prozesse müssen am Ort der Messung in Gang gesetzt und gehalten werden; sie gehören zum beobachteten Objekt selbst. Diese lokale Zeit wird zu einem Maß auf der Weltlinie. Das ist die Eigenzeit. Die Begleitung eines Prozesses durch eine Uhr ist homolog zum Anlegen eines Lineals. Die Relativität bedeutet nun Kongruenz von infinitesimalen Abschnitten gleicher Länge und produziert damit eine Geometrie von Raum und Zeit.

Zunächst erscheint die Geometrie der Zeit trivial. Ist die Koordinatenzeit so gewählt, dass sie mit der Eigenzeit eines bestimmten Objekts zusammenfällt, so scheint sie auch mit den Eigenzeiten aller anderen Objekte zusammenzufallen. Sie wird so zur absoluten Zeit Newtons. Das ist jedoch ein Vorurteil, wie die Relativitätstheorie darlegt. Nur Weltlinien gleicher Orientierung (in der Raum-Zeit) haben einen gemeinsamen Maßstab zur Koordinatenzeit. Bei Weltlinien verschiedener Orientierung finden sich verschiedene Verhältnisse von Eigenzeitintervall und Koordinatenzeitintervall. Dadurch gibt es der Perspektive geschuldete Effekte, die zwar in der Geometrie des Raums bekannt sind, aber eben nicht in der Geometrie mit der Zeit (siehe Abbildung 3).

Das wird besonders deutlich und populär am Zwillingsparadoxon der Speziellen Relativitätstheorie. Der Effekt kommt nicht zustande, weil die Uhren (die zitierten Prozessbündel) in den verschiedenen Messstationen verschieden gehen, sondern weil sie wegen der Relativität gleich gehen. Die Prozesse am Ort des Nesthockers greifen in gleicher Weise ineinander wie die Prozesse am Ort des Zugvogels. Nur ist das Integral der Abläufe vom Wege abhängig (siehe Abbildung 4).

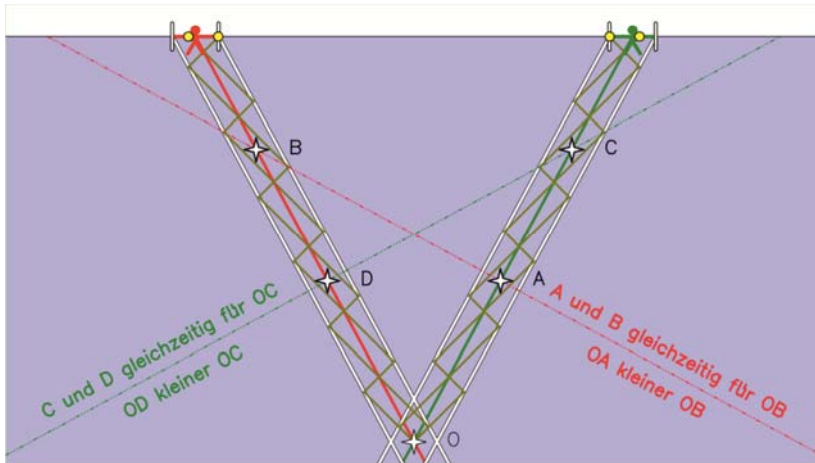


Abbildung 3: Relativität der Gleichzeitigkeit

Gezeichnet sind die Weltlinien zweier gegeneinander gleichförmig bewegter Beobachter. Sie halten jeder eine Lichtuhr, d.h. ein Spiegelpaar mit pendelnden Lichtsignalen. Die Relativität der Gleichzeitigkeit bedeutet, dass die Eigenzeit eines Beobachters gegen die Koordinatenzeit des jeweils anderen zurückbleibt.

Eigene Darstellung

Zeit ist Eigenzeit. Das ist nur verwunderlich, weil es beim Kriechtempo gewohnter Bewegungen nicht auffällt. Die spezielle Relativitätstheorie zeigt, wie die lokale Zeiterfahrung in einen sehr viel größeren Erfahrungsbereich eingebettet werden muss. Die Integrabilität der Eigenzeit geht mit der Relativität der Gleichzeitigkeit verloren. Die absolute Zeit Newtons ist nach heutiger Kenntnis die Unterstellung, dass Umwege in der Raum-Zeit sich in der zeitlichen Dauer vom direkten Weg nicht unterscheiden.¹²

Auch ohne schnelle Bewegung ist die Integrabilität der Eigenzeit nicht sicher. Wenn wegen der Krümmung der Raum-Zeit das erste Newtonsche Axiom aufgeweicht werden muss (zwei unbeeinflusste Objekte können sich auf Grund der gravitativen Anziehung mehrmals begegnen) und die globale Koordination nur auf Geodäten (Extremalen der Eigenzeit) zurückgreifen kann (vgl. Ehlers et al. 1972), entstehen ebenfalls Projektionseffekte (wie die gravitative Rotverschiebung der Spektrallinien).

12 In der Physik vor der Relativitätstheorie fiel es nicht auf, dass die Zeit auf verschiedenen Weltlinien zum gleichen Ziel schon aus konzeptionellen Gründen verschiedene Dauern anzeigen sollte, und so rechnete man mit einer universellen Zeit und mühte sich um konsensfähige Begründungen, sowie man sich bei der Rechnung mit einem Äther vergeblich konsensfähige Begründungen gesucht hat.

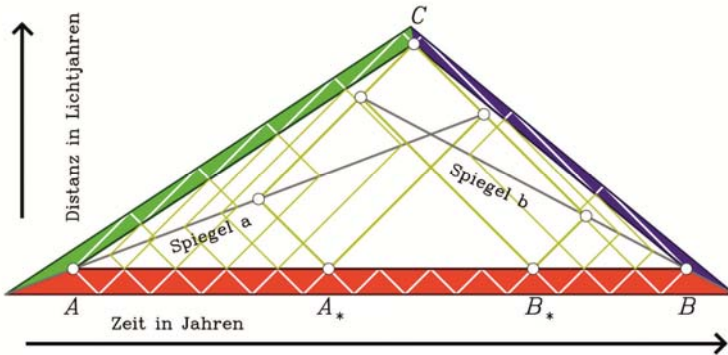


Abbildung 4: Zum Zwillingsparadoxon

Auf der Orts-Zeit-Ebene sind die Dreieckseiten Registrierungen einer Bewegung, etwa die eines Nesthockers (AA^*B^*B) und eines Zugvogels ACB mit Hin- und Rückweg. Gemessen mit der Uhr des Nesthockers kommt die Eigenzeit des Zugvogels langsamer voran als die Zeit auf seiner Projektion. Das zeigt sich dann beim Wiedersehen. Formelfrei sieht man das an Lichtuhren. Eine Lichtuhr ist ein zwischen zwei Spiegeln pendelndes Lichtsignal. Die Lichtuhren AC und CB des Zugvogels werden als Spiegelbilder der Lichtuhr AB des Nesthockers (an den Spiegeln a und b) konstruiert. Diese Konstruktion baut allein darauf, dass Lichtspuren auch bei Spiegelung an bewegten Spiegeln (gegen die Vertikalen geneigten Geraden) nur Lichtspuren bleiben. Deshalb sind C und A^* Spiegelbilder an a , C und B^* sind Spiegelbilder an b . Wir zeigen die Zeit in Jahren, die Distanz in Lichtjahren. Die rote Lichtuhr wird in die grüne und die blaue gespiegelt. Dadurch werden die Zeitdilatation und das Ergebnis des Zwillingsparadoxons offensichtlich. Hier sind die Zeiten 12 Perioden für den Nesthocker, 5 und 3 Lichtschläge für den Zugvogel (ausführlicher vgl. Liebscher 1999).

Eigene Darstellung

4 Weltalter

Die lokale Physik legt für das Universum eine Struktur nahe, in der es eine universelle Koordinatenzeit gibt. Sie bezieht sich auf den materiellen Inhalt des Universums, auf den sich auch alle Bewegung beziehen kann. Seine mittlere Dichte koordiniert wegen der Expansion des Universums eine universelle Zeit. Die Dichte und die durch sie definierte Zeitkoordinate ergeben sich im Rahmen des durch die Allgemeine Relativitätstheorie wohl begründeten kosmologischen Modells (vgl. z.B. Liebscher 2005). Im Gegensatz zur klassischen Mechanik erlaubt die allgemeine Relativitätstheorie konsistente Modelle solcher homogener Universen, und die Beobachtungen in

unserem Horizont lassen uns hoffen, dass das Universum großräumig homogen ist und unsere Beobachtungen charakteristisch für das Universum sind.¹³

Der einzige Freiheitsgrad ist eine Distanz. Deshalb sind alle Funktionen dieser Distanz selbst ein Zeitmaß und definieren eine universelle Zeit. Abgelesen werden könnte sie an der mittleren Dichte des Universums, die allerdings so leicht nicht zu bestimmen ist. Auf diesen Materieinhalt kann Bewegung bezogen werden, er entspricht in diesem Punkt einem omnipräsenten Äther, der aber die Lichtausbreitung gerade nicht beeinflusst oder bestimmt.¹⁴ Der Anschluss der universellen Materiedichte an die lokale Zeit wird durch die *Friedmannschen* Gleichungen gegeben.

Für die lokale Physik ist die kosmologische Zeit unpraktisch, nicht ernsthaft realisierbar und ohne wichtigen Einfluss auf die lokalen Abläufe.¹⁵ Unbeschadet jeder Relativitätstheorie kann man jedoch lokal und überall eine Geschwindigkeit gegen diesen Materieinhalt feststellen, etwa die gegen den Strahlungshintergrund. Wenn man unter einem Äther nur diese Möglichkeit sieht, dann gibt es heute mehr Äther als man sich vor hundert Jahren vorstellen konnte. Die Relativitätstheorie hat mit diesem Äther nichts zu tun. Sie behandelt gerade die Beziehung zwischen den Eigenzeiten gegeneinander bewegter lokaler Systeme, die vom Gravitationsfeld des umgebenden Universums wegen des Äquivalenzprinzips nichts spüren. Und dabei geht es auch nicht um die Existenz oder Nichtexistenz eines lichttragenden Äthers, sondern um die Relativität der Gleichzeitigkeit, also den Fragenkreis der Zuordnung verschiedener Eigenzeiten.

Das lokale Zeitmaß, repräsentiert durch die Atomuhr, ist nun nicht unbedingt das einzige in der Entwicklung des Universums wesentliche Zeitmaß. So findet man mit einer Lichtuhr, die zwischen zwei Galaxien pendelt, ein Zeitmaß, das sich vorteilhaft in den Gleichungen für die Entwicklung von kleinen Störungen des Schwerfeldes verwenden lässt. Im Vergleich zur Atomzeit werden die Perioden dieses Maßes immer länger, weil die Galaxien

13 „Tuttu lu munnu è comu casa nostra“ heißt das auf Sizilianisch.

14 Der Äther ist eine mit besonders vielen Assoziationen beladene Metapher, die ihrerseits zu schönen Beispielen „stiller Post“ führen (vgl. Liebscher 2017). Er soll einmal das ganze Universum durchziehen: das findet sich heute in der Hintergrundstrahlung. Er soll zum anderen keine materiellen Hindernisse spüren: das finden wir heute in den Neutrinos aller Art. In der Elektrodynamik sollte er den Bezug für die Lichtausbreitung liefern. Den gibt es nicht.

15 Die Wirkung der individuellen Struktur des Kosmos auf die lokalen und mikroskopischen Bewegungsgesetze nach Art der in anderem Zusammenhang wohluntersuchten spontanen Symmetriebrechung ist Gegenstand verschiedener Überlegungen zum *Machschen* Prinzip, dem viele Arbeiten von *Treder* gewidmet waren (vgl. Treder 1972; Treder et al. 1996; vgl. auch Bleyer/Liebscher 1986).

mit der kosmischen Expansion auseinanderdriften. Dieses Zeitmaß wird Konformzeit genannt, weil es die winkeltreue Karte (die *Mercator-Karte*) des Universums bestimmt. In dieser Konformzeit hat das Universum nicht nur ein endliches Alter, sondern auch eine begrenzte Dauer. Die Konformzeit bleibt stehen: das Licht überwindet die Entfernungen nicht mehr. Schon heute können wir Galaxien beobachten, die wir auch mit Lichtgeschwindigkeit nicht mehr erreichen können (siehe Abbildung 5).

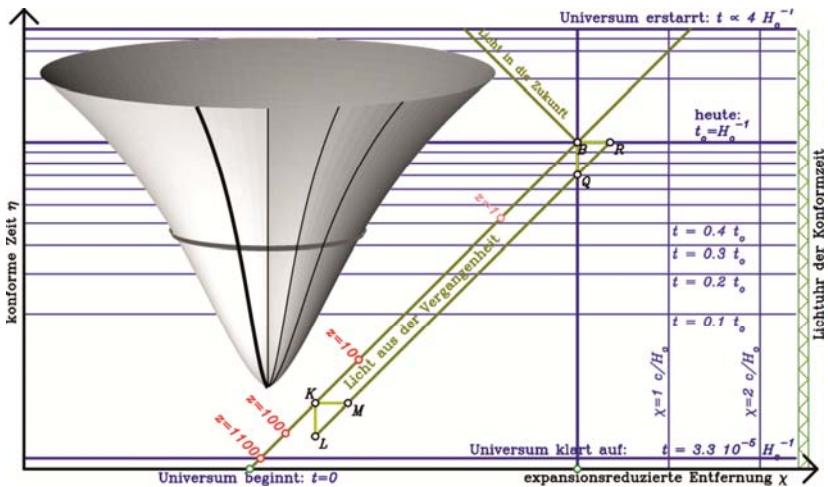


Abbildung 5: Mercator-Karte des Universums

Das expandierende Universum wird zunächst als expandierender Kreis in Form eines Rotationskörpers dargestellt (links). Wie auf der Mercator-Karte der Erde werden nun die Mantellinien als Vertikale abgebildet. Auf den einzelnen Horizontalen ist der Maßstab fest, er ändert sich aber mit der Zeit entsprechend der Expansion. Wie auf den Weltkarten auch ist der Maßstab auf den Vertikalen variabel und wird so eingerichtet, dass die Karte winkeltreu (konform) wird. Winkeltreue heißt nun, dass die Geschwindigkeiten treu abgebildet werden, speziell also die Weltlinien von Licht eine feste Neigung haben. Die zwischen zwei Vertikalen konstruierte Lichtuhr zählt dann die Konformzeit (rechts). Fällt die Expansionsrate nicht unter eine positive Grenze, hat die Karte einen oberen Rand. Divergiert die Expansionsrate in der Vergangenheit, hat die Karte einen unteren Rand. Der Punkt B bezeichnet unsere heutige Position im Universum. Er trägt die Registrierkurven der Lichtsignale, die uns eben erreichen und verlassen. Sie zeigen neben der Darstellung der Rotverschiebung unseren Erfahrungshorizont auf dem unteren Rand und unseren Aktionshorizont auf dem oberen (vgl. ausführlicher und mit weiteren Details Liebscher 2010).

Eigene Darstellung

Die Mercator-Karte zeigt unmittelbar, dass unser Aktionsradius immer mehr abnimmt, während das Gesichtsfeld zunimmt. Wir können immer mehr erfahren, aber immer weniger tun.¹⁶ Das Gesichtsfeld ist aber immer endlich und zeigt die Unterscheidbarkeit der Punkte auch am Anfang. Bereits am Anfang ist das Universum unendlich und kein Punkt.

Der Anfang des Universums ist ein beliebter Gegenstand der Ansätze zur Quantengravitation (vgl. Bojowald 2009, Kiefer 2009). Alles deutet darauf hin, dass es eben problematisch ist, an einem Zeitbegriff festzuhalten, der auf eine Vorgeschichte baut, die es am Anfang gar nicht geben kann. Die Assoziation des Anfangs mit einem ersten Ereignis führt auf die nun wieder klassisch behandelbare Frage, wie sich etwa Stöße der Teilchen eines Gases in einem expandierenden Universum verhalten. Bedenken wir also die Zahl der Stöße zwischen den Teilchen eines Gases als Zeitmaß. Wir nannten es in Abschnitt 2 kinetische Zeit (siehe Abbildung 6).

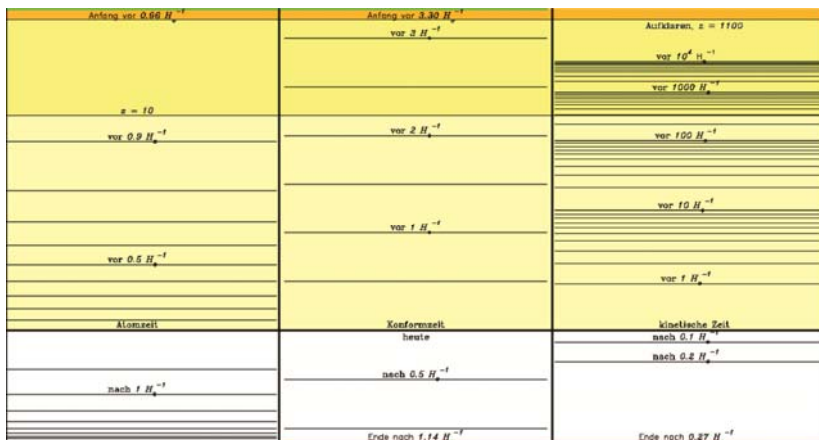


Abbildung 6: Drei Kalender für das Universum

Der Kalender der Konformzeit wird flankiert von den Einträgen der Atomzeit (links) und der kinetischen Zeit (rechts). In diesen Kalendern ist die Zeit nach oben laufend dargestellt. In der Atomzeit und der Konformzeit beginnt der Kalender mit einer Eintragung $t = 0$, in der kinetischen Zeit gibt es keinen ersten Eintrag. Der Kalender endet in der Konformzeit wie in der kinetischen Zeit. Das heutige Alter hat in der Atomzeit die Größenordnung der reziproken Hubble-Konstante.

Eigene Darstellung

16 „Wir hören immer mehr und es verschlägt uns immer mehr die Sprache“, sagen die Spötter.

Für das Universum ist eben auch wichtig, wie viele Einzelprozesse in seinem Rahmen stattfinden. Zumindest in der Frühzeit des Universums ist das von Bedeutung, etwa bei der primordialen Kernsynthese. In diesem Maß, der kinetischen Zeitskala, hat das Universum ein noch schnelleres Ende: Die Verdünnung sorgt für den Abbruch aller Reaktionen (vgl. Liebscher 2012). Allerdings hat das Universum nun keinen Anfang mehr. Um im Bild eines Teilchengases zu bleiben: Es gibt keinen ersten Stoßprozess, mit dem eine Zählung anfangen könnte.

5 Fazit

Die Zeit ist eine Struktur in der Natur, die unabhängig vom Subjekt rekonstruierbar ist. Diese Struktur ist eine Art Erinnerungstapel, eine Art Präsenz der Geschichte. Sie liefert die Asymmetrie von Vergangenheit und Zukunft. Das subjektive Zeiterleben ist eine Projektion dieser Struktur ins Bewusstsein.

Periodische Systeme werden erst durch Zählen zu einer Uhr. Dieses Zählen entspricht dem Aufbau eines zeitlich lokalen Erinnerungstapels.

Die Eigenzeit ergibt sich lokal als Zeitmaß aus dem Zusammenspiel (der Verzahnung) der lokal beobachtbaren Prozessbündel. Die lokalen Prozessbündel sind unabhängig von Position und Orientierung in der Raum-Zeit-Union. Diese Relativität bestimmt eine Kongruenz, die eine Geometrie der Raum-Zeit-Union präsentiert. Die Geometrie bestimmt die Projektion allgemeiner Prozesse auf das lokale Prozessbündel. Es ist eine zweite Frage, ob die lokalen Zeitmaße integrierbar sind, d.h. auf eine absolute Zeit führen. Die Existenz einer absoluten Geschwindigkeit verhindert diese Integrierbarkeit.

Im Rahmen seiner Homogenität definiert das Universum eine absolute (hier: von der Bewegung seiner Teile gegeneinander unabhängige) Zeit, deren Kalender aber nicht auf die Atomzeit festgelegt werden müssen und für das Weltalter neue Gesichtspunkte bereithalten.

Literatur

- Assmann, J. (2012): Sternzeit und Steinzeit: Altägyptische Zeitvorstellungen. In: Gendolla, P.; Schulte, D. (Hg.): Was ist die Zeit? München, S. 69–78
- Bachmann, F. (1959): Der Aufbau der Geometrie aus dem Spiegelungsbegriff. Heidelberg u.a.O.
- Barbour, J. B. (1999): The End of Time. London

- Barbour, J. B.; Foster, B. Z.; Murchadha, N. Ó. (2002): Relativity without Relativity. In: *Classical and Quantum Gravity*, Vol. 19/No. 2, pp. 3217–3248
- Barbour, J.; Koslowski, T.; Mercati, F. (2014): Identification of a Gravitational Arrow of Time. In: *Physical Review Letters*, Vol. 113/No. 18, p. 181101
- Bleyer, U.; Liebscher, D.-E. (1986): Induced Causality. In: *Astronomische Nachrichten*, Jg. 307, S. 267–270
- Bojowald, M. (2009): Zurück vor den Urknall. Die ganze Geschichte des Universums. Frankfurt/M. u.a.O.
- Ebeling, W.; Freund, J.; Schweitzer, F. (1998): *Komplexe Strukturen: Entropie und Information*. Stuttgart, Leipzig
- Ehlers, J.; Pirani, F. A. E.; Schild, A. (1972): The Geometry of Free Fall and Light Propagation. In: O’Reifeartaigh, L. (ed.): *General Relativity. Papers in Honour of J. L. Synge*. Oxford, pp. 63–84 (republished in: *General Relativity and Gravitation*, Vol. 44 [2012], pp. 1587–1609)
- Hörz, H. (1989): *Philosophie der Zeit. Zeitverständnis in Geschichte und Gegenwart* (2. Aufl. 1990). Berlin
- Kiefer, C. (2009): *Der Quantenkosmos. Von der zeitlosen Welt zum expandierenden Universum* (2. Aufl.). Frankfurt/M.
- Liebscher, D.-E. (1999): *Einsteins Relativitätstheorie und die Geometrien der Ebene*. Stuttgart, Leipzig (englische Ausgabe: *The Geometry of Time*. Weinheim 2005)
- Liebscher, D.-E. (2005): *Cosmology*. Berlin u.a.O. (Springer Tracts in Modern Physics, 210)
- Liebscher, D.-E. (2010): Die Mercator-Karte des Universums. In: *Astronomie und Raumfahrt im Unterricht*, Jg. 47/Heft 5, S. 24–27
- Liebscher, D.-E. (2012): Vom Anfang und Ende der Zeit. In: Gendolla, P.; Schulte, D. (Hg.): *Was ist die Zeit?* München, S. 211–232
- Liebscher, D.-E. (2017): Stille Post, ganz relativ. In: *Leibniz Online*, Nr. 26. – URL: <https://leibnizsozietaet.de/wp-content/uploads/2017/02/Liebscher.pdf>
- Treder, H.-J. (1972): *Die Relativität der Trägheit*. Berlin
- Treder, H.-J.; Bleyer, U.; Liebscher, D.-E. (1996): Jacobi’s Principle and Hertz’ Definition of Time. In: Pronin, P.; Sardanashvili, G. (eds.): *Gravitation, Particles and Space-Time*. Singapore, pp. 207–215
- Zeh, H. D. (1989): *The Physical Basis of the Direction of Time* (5th ed. 2007). Berlin u.a.O.
- Zimmermann, R. E. (2004): *System des transzendentalen Materialismus*. Paderborn