

Vom Anfang und Ende der Zeit

Dierck-E.Liebscher, Potsdam

1. Die Zeit

Zeit ist Veränderung. Ohne Veränderung gibt es keine Zeit. Der zeitlose Zustand ist die Ewigkeit: Alle Systeme sind stationär, nichts geschieht. Ein abgeschlossenes System in einem stationären Zustand ist eine Welt ohne Zeit.

Wir erleben Veränderung an uns und an unserer Umgebung. Zunächst einmal sammeln wir Erinnerungen. Die Richtung dieses Sammelns ist die Richtung unserer persönlichen Zeit. Spätere Zeiten sind immer die eines größeren Erfahrungsbereichs. In diesem Sinne erinnern wir uns nicht an die Zukunft, weil das, woran wir uns erinnern, die Vergangenheit definiert.¹ Die Veränderungen in unserer Umgebung werden nun mit diesem wachsenden Umfang unseres Erfahrungsbereichs verglichen. So erhalten sie eine zeitliche Reihenfolge.

Das Merkwürdige der an uns und an unserer Umgebung beobachteten Veränderungen ist die gemeinsame Richtung, die sie in ihrer Gesamtheit haben. Unabhängig von der speziellen Voreinstellung der Systeme, die wir beobachten, zeigen sie im Groben immer dasselbe Verhalten, nämlich die Entwicklung zu einem Grundzustand und einem thermischen Ausgleich. Jeder Zustand wird in der Kette der Folgezustände im Allgemeinen nur einmal durchlaufen.² Diese Monotonie generiert die Zeit. Wie das Naturgesetz elementar aussieht, das dies bewirkt, wird immer wieder diskutiert. Man vermutet eine Kombination der statistischen Eigenschaften der Thermodynamik und der Mechanik der molekularen Bewegungen, die jedoch immer noch Fragen aus der Feldtheorie offen lässt. Das soll aber nicht unser Thema sein. Wir wollen uns hier mit der Beobachtungstatsache einer rigorosen Zeitrichtung begnügen, kommen aber noch einmal darauf zurück.

Kann man die Zeit beschleunigen, verzögern, anhalten, umkehren? Ja, selbstverständlich! Allerdings muss man beachten, dass Zeit nur durch Veränderungen bestimmt ist, die wir auf andere Veränderungen beziehen. Beziehen wir die Veränderungen auf unseren Erinnerungsbereich, dann kann die Zeit nur relativ zu diesem Zeitablauf manipuliert werden: Die Dampfmaschine beschleunigt die Zeit, die durch den Temperatúrausgleich zweier Reservoirs bestimmt ist, der Kühlschrank verzögert die Zeit, die durch das Verderben der Lebensmittel bestimmt ist, ja das Gefrierfach hält deren Zeit nahezu an.

Umgekehrt bleibt, verglichen mit der Zeit unserer Umgebung, unsere persönliche Zeit während des Schlafes stehen. Wer nachts aufwacht, weiß aus

¹ Das hört sich etwas nach Augustinus an. Jedoch ist nur das persönliche Zeitgefühl so bestimmt. Auch ohne uns ist die Zeit als Beziehung zwischen den Veränderungen der Objekte zu beobachten, und unser persönliches Zeitgefühl ist konsistente Folge der Gesetze, die diese Beziehung bestimmen.

² Ein reales periodisches System -- so es nicht im Grundzustand ist -- wird nur bei wiederkehrendem Eingreifen echt periodisch. Wenn eine Uhr nicht aufgezogen wird, bleibt sie irgendwann stehen.

Erfahrung, dass äußere Zeit vergangen ist, aber er weiß nicht wieviel, bevor er auf die Uhr gesehen hat. Seine persönliche Zeit scheint stehengeblieben.

Die Zeit umkehren geht nur für ganz einfache Systeme und einzelne Zeitpunkte. Es ist für Systeme möglich, die keine Erinnerung haben, und deren Zustände wir wiederholt präparieren können. Damit wird auch nicht der eigentliche Zeitlauf umgekehrt, sondern nur wiederholt. Die Experimentalphysik lebt davon.

Wir können der Zeit eine Koordinate geben, deren Wachsen das Fortschreiten der Zeit beschreibt. Solcher Koordinaten gibt es viele.³ Im Grunde kann jedes sich verändernde Objekt als Orientierung dienen. Jedoch werden nur bei bestimmter Wahl der Koordination die Gesetze, denen die Veränderungen gehorchen, besonders einfach formulierbar. Das sind die idealen Zeitmaße. Mit ihnen werden Zeitintervalle messbar und vergleichbar.

2. Die Uhr

Zeitmessung ist die Zählung wiederkehrender Abläufe. Ohne mechanische Hilfe bestimmen wir Zeitintervalle nach Jahren, Monden und Tagen. Solange nur Veränderungen gemessen werden sollen, die mehr als eines Tages bedürfen, ist das Zählen der Sonnenaufgänge eine ausreichende Uhr: Ausreichend heißt, dass man mit ihr Gesetzmäßigkeiten der Abläufe finden kann. Sonnenuhr und Klepsydra konnten schon in der Antike die Intervalle verfeinern. In der Geologie und Archäologie wird die Zeit auch an vordergründig nichtperiodischen Abläufen bestimmt, wenn man an den radioaktiven Zerfall oder die Schichtenfolge in einem Sediment denkt.

Die Messung schneller Veränderungen erfordert eine entsprechend kurze Periode, etwa die einer Pendeluhr.⁴ Es bleibt zunächst ein Problem, das subjektive Gefühl der Gleichmäßigkeit⁵ physikalisch - d.h. nichts anderes als objektiv - zu fixieren.

Wie kommt man zu einem vermittelbaren und reproduzierbaren Standard? Wenn man einen Prozess findet, der linear mit der Periode einer guten Uhr fortschreitet, sollte diese Linearität sich auch in den Perioden der anderen

³ Die Gesamtmenge Alkohol, die man getrunken hat, ist ein Zeitmaß eher für die Leber. Karl May beschreibt mit dem Ausdruck „die Anzahl der Winter, die mein Auge gesehen hat“ dies schon besser. Ähnlich gut oder schlecht ist die Anzahl der echten Kriegsbeile, die ausgegraben wurden, oder die Anzahl der falschen Friedenspfeifen, die geraucht wurden, usf.

⁴ Gelegentlich wird der Herzschlag als Zeitgeber empfohlen, speziell bei Musik und Tanz. Das ist poetisch, aber falsch. Der Herzschlag ändert sich bei Musik und Tanz, auch wenn diese ihr Metrum beibehalten, und kann wahrlich keine Gleichmäßigkeit beanspruchen. Er verändert sich bei jeder neuen Aufregung, bei jeder neuen Anstrengung. Da ist das Bein als Pendel sehr viel besser geeignet, und die Marschmusik nutzt das auch unverfroren aus.

⁵ Die Zeit nach Christian Morgenstern:

Es gibt ein sehr probates Mittel, die Zeit zu halten am Schlawittel: Man nimmt die Taschenuhr zur Hand und folgt dem Zeiger unverwandt,

Sie geht so langsam dann, so brav als wie ein wohlgezogen Schaf, setzt Fuß vor Fuß so voll Manier als wie ein Fräulein von Saint-Cyr.

Jedoch verträumst du dich ein Weilchen, so rückt das züchtigliche Veilchen mit Beinen wie der Vogel Strauß und heimlich wie ein Puma aus.

Und wieder siehst du auf sie nieder; ha, Elende! -- Doch was ist das? Unschuldig lächelnd macht sie wieder die zierlichsten Sekunden-Pas.

guten Uhren ausdrücken. Zwei gute Uhren können sich im Gang unterscheiden, das können wir durch einen Umrechnungsfaktor berücksichtigen. Sie können sich auch im Zeitvergleich unterscheiden, das berücksichtigen wir durch eine Konstante. Nur die Gleichmäßigkeit des Gangs ist erforderlich. Abläufe, die nach der einen guten Uhr immer wieder gleiche Intervalle benötigen, sollen auch mit anderen guten Uhren gleiche Zeitintervalle definieren.

Wie kommt man zu einer idealen Uhr? Wenn wir zwei gute Uhren haben, welche ist die genauere (d.h. die gleichmäßigere)? Es wird die Uhr sein, die am wenigsten von ihrer aktuellen Umgebung und ihrer aktuellen Bewegung (Beschleunigung) abhängt. Wenn wir an eine Schwingung denken, so geht eine mit ihr konstruierte Uhr um so gleichmäßiger, je fester die Schwingung ist, je kürzer ihre Periode ist. Chronometer (Drehpendeluhren) können besser als Regulatoren sein, Quarzuhren besser als Chronometer, Atomuhren besser als Quarzuhren usw. Wir können diese Uhren zunächst immer nur aneinander vergleichen, nicht an einem idealen Standard. Eine Ausnahme ist die Ephemeridenzeit, die nach dem Stand der Planeten bestimmt wird. Das soll kurz erläutert werden.

Kepler's zweites Gesetz stellt fest, dass man die ideale Gleichheit zweier Zeitintervalle an die ideale Flächenmessung eines Sektors der Ellipsenbahn eines Planeten binden kann. Die gleichmäßigste Zeit ist die, die zu den Kepler'schen Gesetzen und generell zur Newton'schen Mechanik am besten passt.⁶ Bis zur Erfindung der Atomuhren gab es nichts Genaueres, d.h. nicht Gleichmäßigeres. Dennoch bleiben Zeitabläufe relativ: Man kann den einen nur an einem anderen messen. Die Wahl eines Standards macht das Ganze nicht absolut.

Immerhin lässt sich der nach Kepler gewählte Zeitstandard erfolgreich benutzen, um den Ablauf anderer, auch nicht periodischer Prozesse kurz und übersichtlich zu beschreiben, man denke dabei an die kanonische Mechanik, die Reaktionskinetik oder die Feldtheorie.

Man kann sogar versuchen, die Zeit völlig aus der Physik herauszuhalten. Man muss dann eben darauf verzichten, eine externe Uhr zu benennen oder zu unterstellen, sondern die Veränderungen der Teile des Systems aufeinander beziehen [1]. Diese Möglichkeit, eine explizite Nennung der Zeit zu vermeiden, ändert nichts an der praktischen Einfachheit des Zeitbegriffs in der Formulierung unmittelbar handhabbarer Zusammenhänge. Schließlich wird die Monotonie der Zustandsfolge dadurch nicht beseitigt. Diese Monotonie ist aber gerade impliziter Ausdruck des Zeitlaufs.⁷

Hier soll nicht auf die Präzisierung eingegangen werden, die von der Relativitätstheorie für die Zeitmessung und den Zeitvergleich gefordert wird. Das sind geometrische Fragen, die andernorts [7] ausführlich behandelt worden sind. Nur eins muss hier klargestellt werden. Der Spruch „Zeit ist ohnehin relativ“ betrifft nicht die Relativitätstheorie, sondern die im vorigen Abschnitt behandelte Definition der Zeit als Relation zwischen den Veränderungen nebeneinander beobachteter Objekte.

3. Die Richtung der Zeit

Selbst wenn man die Metapher vom „ständigen Werden und Vergehen“ im Munde führt, so ist das Vergehen nie ein rückwärtslaufendes Werden. Das Ende einer Entwicklung ist nie das Zurücklaufen in deren Anfang. Die Zeit hat

⁶ Dieses Zeitmaß ist deshalb keine Erfindung, sondern eine Entdeckung.

⁷ Die Zeit verstreicht auch ohne Uhr, meinen die Spötter.

in diesem Sinne eine Richtung. Ein Objekt bestimmter Charakteristik, das sich tatsächlich verändert, wird nach einer Weile nicht mehr wiederzuerkennen sein. Seine Charakteristik wird sich verloren haben. Diese Weile ist die Lebensdauer des Objekts.

Rechnen wir Zeit nach Lebensdauer, dann hat jedes Objekt seine eigene Zeit, aber alle diese Zeiten haben die gleiche Richtung. Die Zeitrichtung, die wir empfinden und physikalisch auch belegen können, ist die des thermodynamischen Ausgleichs.⁸ Wenn nicht von außen eingegriffen wird, verteilt sich die Energie eines Systems mit der Zeit in ganz bestimmter Weise auf seine Freiheitsgrade (Bewegungsmöglichkeiten). Ist diese Verteilung erreicht, ändert sich nichts mehr, die Zeit des Systems bleibt in unserem Sinne stehen.

Energie verteilt sich, koordinierte (präparierte, organisierte) Bewegung verliert sich auf diese Weise in unorganisierte, nicht mehr koordinierbare Bewegung der Teilchen (die wir als Wärme empfinden und messen) und Felder (die wir am Beispiel der Wärmestrahlung kennen). Zustände, die noch nicht so thermodynamisch ausgeglichen sind, haben wir entweder geerbt (Stichwort fossile Energie), oder sie entstehen unter Aufwendung dieser Energie, oder wir müssen sie unter Aufwendung solcher Energie präparieren. Wenn man bedenkt, woher diese schließlich kommt, wird man sehr schnell dahin geführt, die Vorgänge im ganz Großen, im Universum zu betrachten.

Die astrophysikalischen Erkenntnisse der letzten hundert Jahre haben zur Entdeckung eines Musters geführt, das die Frage der Beziehung zwischen Universum und Zeit mit einfachen Mitteln (denen der gewohnten Thermodynamik) beantwortet. In den nächsten beiden Abschnitten muss deshalb in gebotener Kürze auf die grundlegenden Eigenschaften des Universums eingegangen werden, bevor wir zur Diskussion der Zeit zurückkehren können.

4. Die Expansion des Universums

Das Universum fasst alles zusammen, was uns umgibt. Alles: Das heißt, ein Jenseits des Universums gibt es nicht. Das Universum ist alles. Das meiste davon sehen wir nicht, und wenn wir etwas über das Universum aussagen wollen, müssen wir unterstellen, dass es auch dort, wohin wir nicht blicken können, im Großen und Ganzen so aussieht wie in dem überschaubaren Bereich.⁹ Die Geschichte dieser Erkenntnis beginnt schon in der Antike mit der Vorstellung, dass es keinen Rand des Universums geben könne und schon vor Kopernikus mit der Einsicht, dass es keinen Mittelpunkt des Universums geben sollte.

Natürlich kann man sich auch auf den Standpunkt stellen, dass das Universum nur in dem von uns beobachtbaren Bereich so aussieht, wie es scheint. Oder man denkt daran, dass es mehrere voneinander isolierte Teilbereiche des Universums geben könne (die man Multiversen nennt) und Ähnliches. Dann hat man eben nichts Besseres als die Beruhigung, dass alles, was uns betrifft, beobachtbar oder erschließbar ist (eben weil es uns betrifft), und alles was prinzipiell nicht beobachtbar oder erschließbar ist, uns auch nicht betrifft. Die Annahme, unser Teil des Universums habe in seiner Nähe einen

⁸ Wir untersuchen hier nicht die Probleme der mikroskopischen Begründung dieser Irreversibilität mit Zeitumkehr-invarianten mikroskopischen Prozessen, verweisen aber auf die Diskussion dieser Frage [3,12].

⁹ „Tuttu lu munnu è comu casa nostra“, sagt man in Sizilien: Überall auf der Welt geht es zu wie bei uns zu Hause.

Rand, findet allerdings keine beobachtungsseitige Stütze. Deshalb halten wir uns zu Recht an das sizilianische Sprichwort.

Das Universum hat eine Geschichte. Nicht zu jeder Zeit gab es Sterne, nicht zu jeder Zeit gab es Planeten, nicht zu jeder Zeit war das Universum so durchsichtig wie heute. Die Ursache: Das Universum expandiert.

Schon vor der Konstruktion der Allgemeinen Relativitätstheorie konnte man eine Expansion des Universums vermuten. Die Newton'sche Mechanik kann nämlich überhaupt kein unendliches Universum mit positiver Materiedichte modellieren, und nach ihren Gesetzen muss eine begrenzte Wolke am Ende immer expandieren, wenn die Teilchen und ihre Schwerkraft klein genug sind.

Ein konsistentes Modell für ein im Großen homogenes Universum konnte erst mit den Strukturen der Allgemeinen Relativitätstheorie konstruiert werden [9]. Diese beschreibt das Gravitationsfeld als Einfluss der Materie auf die geometrischen Eigenschaften von Zeit und Raum, genauer als Krümmung von Zeit und Raum.¹⁰

Was wir als Raum zu fester Zeit ansehen wollen, kann nun selbst auch gekrümmt sein. Deshalb muss ein unbegrenztes Universum nicht mehr unendlich sein, sondern kann sich wie die Oberfläche einer Kugel in sich selbst schließen. Einstein hat denn auch das Universum als einen solchen Raum angesehen. Er konnte zeigen, dass es ein auch stationäres Modell des Universums gibt, so man eine Art Grundkrümmung der Raum-Zeit (die sogenannte kosmologische Konstante) zulässt.

Friedmann erst hat zu Einstein's ungläubigem Erstaunen gezeigt, dass erstens die allgemeine Lösung der Gleichungen ein Universum mit zeitabhängiger Skala ist und dass man zweitens auch mit unendlichem Raum und ohne Grundkrümmung der Raum-Zeit zu widerspruchsfreien Modellen kommt. Wo sind die Objekte, die die von Friedmann errechneten veränderlichen Skalen des Universums markieren und sichtbar werden lassen? Edwin Hubble fand sie in den Galaxien, Weltinseln wie unsere Milchstraße. Deren Licht lässt sich analysieren wie die Verkehrspolizei ihr Radar analysiert. Dann sieht man, dass sich die Galaxien im Wesentlichen von uns entfernen, und zwar um so schneller, je weiter sie von uns entfernt sind. Ein großes, von bestimmten Galaxien abgestecktes Volumen wird immer größer, wobei wegen der unterstellten großräumigen Homogenität des Universums die Bilanz der Teilchenbewegung und Strahlung durch die nur vorgestellten Wände immer aufgeht. Ein solches Volumen kann also mit den Mitteln der gewohnten Thermodynamik als adiabatisch abgeschlossenes Volumen behandelt werden.

5. Die beobachtbaren Momente der Geschichte des Universums

Die Allgemeine Relativitätstheorie liefert ein vergleichsweise einfaches Modell des Universums mit zunächst einfachen Entwicklungsgleichungen. Das Universum ist aber kein Labor, in dem man Zustände wiederholt präparieren und deren Entwicklung wiederholt verfolgen kann. Die (zukünftige) Entwicklung

¹⁰ Diese Krümmung äußert sich unter anderem darin, dass es durch zwei Punkte der Raum-Zeit-Union jetzt mehrere Kurven geben kann, die einzeln als gerade angesehen werden sollten, so wie durch Nord- und Südpol mehrere (alle) Meridiane gehen. Dass Raum und Zeit erst gemeinsam zu anwendbaren Vorstellungen von Spiegelung, Kongruenz und Maß einer Strecke führen, wurde schon 1905 gefunden.

des Universums kann überhaupt nicht verfolgt werden: Dafür ist das Leben viel zu kurz.

Deshalb muss man anders vorgehen: Wir errechnen nicht die Zukunft, sondern die Vergangenheit, um auf plausible Zustände in der Frühzeit des Universums zu schließen. Vermuten wir solch einen Anfangszustand, können wir nun dessen Entwicklung berechnen. Wir erwarten dann natürlich, dass sich für den heutigen Zeitpunkt auch der heutige Zustand ergibt.

Rechnen wir die Expansion in die Vergangenheit zurück, können wir immer heißere und immer dichtere Zustände erwarten. Zusammen mit der Beobachtung, dass Gravitation ausschließlich als Anziehung wirkt, müssen Temperatur und Dichte bei der Rückrechnung über alle Grenzen steigen. Dann muss es in der Vergangenheit Zeiten gegeben haben, wo selbst Atome und Atomkerne nicht stabil und bereits durch die thermischen Energien in ihre Bestandteile zerlegt waren.

Vorwärts gerechnet haben sich alle gebundenen Systeme, speziell die Atomkerne und die Atome, aber auch die gravitativ gebundenen Systeme (Sterne und Galaxien) erst im Laufe der mit der Expansion einhergehenden Abkühlung bilden können. Diese Bildungen kann man mit den ganz irdischen physikalischen Erfahrungen nachrechnen und erhält dabei an den Stellen, wo Beobachtungen möglich sind, auch zutreffende Ergebnisse.

Allerdings kann sich bei der Vorwärtsrechnung noch mehr ergeben, als wir bereits wissen. Zum Einen kann sich zeigen, was wir noch suchen müssen. Zum Andern kann sich aber auch herausstellen, dass mehr bereits bekannte Beobachtungstatsachen kosmologisch relevant sind, als zunächst angenommen werden konnte. In beiden Fällen finden wir echte Tests der theoretischen Modelle.

Zwei Beobachtungen sind es, die das Vertrauen in die kosmologische Rückrechnung in besonderer Weise stützen. Die erste betrifft die Hintergrundstrahlung. Sie entsteht wie folgt. Wir beobachten an der Sonnenoberfläche, dass das Gasgemisch aus Wasserstoff und Helium undurchsichtig wird, wenn die Temperatur etwa 4000 K erreicht. Dann sind alle Atome ionisiert und reagieren mit dem Licht so stark, dass sich kein Photon ungestört und geradlinig bewegen kann. So sollte es einmal im Universum gewesen sein.

Nun starten wir die Rechnung vorwärts in der Zeit. Zunächst ist das Universum undurchsichtig. Nach Abkühlung unter diese Grenze nahe 4000 K sollten sich die Atome gebildet haben, neutrale Systeme, die mit dem Licht nur noch sehr spezifisch reagieren. Das Universum sollte also erst zu diesem Zeitpunkt durchsichtig geworden sein, und die Wärmestrahlung sollte sich danach ohne Störung durch die Atome abgekühlt haben.

Man kann bereits durch grobe Argumente abschätzen, dass die Temperatur seit diesem Zeitpunkt auf etwa ein Tausendstel gesunken ist. Penzias und Wilson sind die Namen, die für die Entdeckung dieser auf tatsächlich 2.7 K abgekühlten Strahlung stehen, die R.Dicke als das universelle Wärmebad identifizierte, lange nachdem es von G.Gamow vorhergesagt worden war.

Diese Entdeckung zeigt, dass die Expansion bis auf eine Temperatur oberhalb 4000 K und eine entsprechende Verdichtung von $1:10^9$ zurückgerechnet werden darf [4,6,10].

Die zweite Beobachtung ist die der Deuteriumkonzentration. Etwa ein Viertel der Masse eines Hauptreihensterns ist Helium. Der Atomkern des Heliums besteht aus zwei Protonen und zwei Neutronen. Die Bildung eines Heliumkerns ist auf die vorherige Bildung eines Deuteriumkerns (aus einem Proton und einem Neutron) angewiesen. Die Bindungsenergie des Deuteriums ist etwa 2 MeV. Diese Energie bringen Teilchen bei Temperaturen größer 10^{10} K

locker auf. Wenn wir vermuten, dass die Expansion der Universums so weit zurückreicht, war das Universum einmal so heiß. Neugebildete Deuteronen werden dann durch thermische Stöße gleich wieder zerstört. Die Expansion sorgt nun für Abkühlung. Ab etwa $3 \cdot 10^9$ K bleiben Deuteronen so lange erhalten, dass sie durch Anlagerung von Protonen oder Neutronen zu Heliumkernen aufwachsen können. Heliumkerne sind dann so fest gebunden, dass sie nicht mehr zerstört werden können.

Die Expansion sorgt aber nicht nur für Abkühlung, sondern auch für Verdünnung, so dass das Aufwachsen abbricht. Die Rechnung zeigt, dass sich etwa 25% der Baryonen zu Heliumkernen zusammenfinden, dass aber auch auf 100000 Protonen (Wasserstoffkerne) ein Deuteriumkern übrig bleibt. Man beobachtet dieses Deuterium in den Absorptionslinien kühler Wasserstoffwolken. Die Rechnungen von Wagoner, Fowler und Hoyle gehen weit ins Detail. Wo ihre Ergebnisse geprüft werden können, ergibt sich kein Widerspruch. Wir können also ohne Zögern die Expansion bis auf eine Verdichtung von $1:10^{27}$ zurückrechnen.

Die theoretischen und beobachtungsseitigen Ergebnisse der Elementarteilchenphysik lassen vermuten, dass in noch fernerer Vergangenheit, bei Temperaturen um 10^{28} K, eine Entwicklungsetappe existierte, die man im allgemeinen die inflationäre Phase nennt.¹¹ Wir kommen im Abschnitt 8 auf sie zurück.

6. Zeitmaße im Universum

Bisher haben wir als Zeitgeber das Planetensystem kennengelernt. Die Skala der Zeit wird so gewählt, dass die Beschreibung der Planetenbewegung möglichst einfach wird. Es hat sich gezeigt, dass mit dieser Wahl auch die Physik der mikroskopischen Prozesse erfolgreich aufgeklärt werden kann. Ein wenig ist das der Tatsache zu verdanken, dass diese Prozesse zunächst konstanten äußeren Bedingungen unterliegen. Dann ist es eben gleich, ob wir die Schwingungen einer Molekel zählen oder die Stöße zwischen den Molekeln eines Gases oder das Pendeln eines Photons zwischen zwei Spiegeln festen Abstands. Im expandierenden Universum aber verdünnt sich das nicht kondensierte Gas und die Entfernungen werden größer. Deshalb führen hier diese drei Zählungen zu verschiedenen Zeitmaßen.

Zunächst betrachten wir dazu ein ganz einfaches Modell, ein Universum ohne Grundkrümmung mit einem idealen Gas, dessen Teilchen einen energieunabhängigen Streuquerschnitt haben. Der Expansionsparameter $a[t]$ ist proportional $t^{2/3}$, die Teilchendichte n proportional $1/a^3$ und die mittlere Geschwindigkeit v der Teilchen proportional $1/a$. Bei festem Streuquerschnitt ist dann die mittlere stoßfreie Zeit eines Teilchens proportional $1/(nv)$ und damit proportional a^4 . Zählen wir nun die Stöße eines gegebenen Teilchens, und soll die dieser Zahl proportionale Zeit N heute wie t wachsen, ergibt sich $dN = dt (t_0/t)^{8/3}$ und $(N - N_0) = t_0 (1 - (t_0/t)^{5/3})$.

Während die Zeit im Maß t einen Anfang, aber kein Ende hat (t von 0 bis Unendlich), hat das Zeitmaß N ein Ende, aber keinen Anfang, N läuft von minus Unendlich bis zu einem endlichen Wert ($N_0 + t_0$). Man sieht an diesem Beispiel, dass die Vorstellung vom Anfang und Ende der Zeit sehr davon abhängt, welche Veränderungen im Universum man zählen will.

Wichtiger als das Modell des idealen Gases ist das Zeitmaß, das sich beim Zählen der Wiederkehr eines Lichtsignals ergibt, das zwischen zwei

¹¹ Eine absichtsvoll einfache Darstellung findet man in [9].

Spiegeln festen Abstands hin- und herläuft. Dieses System wird in der speziellen Relativitätstheorie gelegentlich als Lichtuhr zitiert, weil es sich so einfach geometrisch analysieren lässt und ideale Zeitvergleiche zulässt [8]. Nun aber soll die Entfernung der Spiegel mit der Expansion zunehmen. Dann zählt die Lichtuhr die Länge eines Dialogs zwischen Galaxien, d.h. die Wechselwirkungen über genuin kosmische Distanzen hinweg. Dieses Zeitmaß heißt aus Gründen, die wir im nächsten Abschnitt kennenlernen, konforme Zeit und ist über die Konstruktion hinaus bei der Verfolgung der Entwicklung der gravitativen Kondensation von Bedeutung. Wir erläutern es gleich an Hand einer Darstellung der Geschichte des Universums, die auch für die Veranschaulichung vieler anderer geometrischer Eigenschaften des Universums wichtig ist.

Nach der im allgemeinen benutzten Atomzeit ist das Universum etwa eine Hubble-Zeit alt (13.7 Milliarden Jahre). Zur Zeit des Aufklarens hatte das Universum ein Alter von einigen hunderttausend Jahren, am Ende der Inflation war es etwa 10^{-33} Sekunden alt, und 98% dieser Zeit war tatsächlich Inflation. Und die Atomzeit wird kein Ende haben. Gerechnet in konformer Zeit dagegen friert das Universum in 15 Milliarden Jahren ein, ist allerdings schon seit 45 Milliarden Jahren durchsichtig. Etwas über 2 Milliarden Jahre war es zur Zeit des Aufklarens alt, das Ende der Inflation war erst nach 10^{-13} Sekunden, die Hälfte davon war Inflation. Gerechnet in kinetischer Zeit friert das Universum bereits nach 3.7 Milliarden Jahren ein, ist allerdings schon seit fast 10^{12} Jahren durchsichtig. Das Ende der Inflation war vor 10^{69} Jahren und ihr Anfang vor mehr als 10^{137} Jahren, einen Anfang gibt es nicht. So viel zu den möglichen Zeitrechnungen.¹²

7. Die Mercator-Karte der Geschichte des Universums

Wir registrieren die Bewegung der Galaxien auf einem Streifen und wählen die Spuren als vertikale Linien analog den Meridianen auf der Weltkarte [11]. Der Maßstab der räumlichen Abstände auf den Horizontalen des Streifens ändert sich nun mit der Zeit wie sich auch der Maßstab der Breitenkreise auf der Weltkarte mit der Breite ändert. Aus dem Abstand auf dem Streifen ist die Expansion herausgerechnet: Es ist ein expansionsreduzierter Abstand.

Mercator's Idee war, auch den Maßstab der Meridiane mit dem der Breitenkreise so variieren zu lassen, dass die Winkel auf der Karte immer gleich denen auf der Erdkugel selbst sind. Dann erhält man eine konforme (d.h. Winkeltreue) Karte der Erdoberfläche, auf der man einen festen Kurs von Hafen zu Hafen durch Anlegen eines Lineals bestimmen kann. Auf dem Registrierstreifen lassen wir entsprechend den Maßstab auf der Zeitachse so variieren, dass die Spuren von Lichtsignalen immer die gewohnte gleiche Neigung haben und wie alle anderen Weltlinien konstanter Geschwindigkeit wieder mit dem Lineal gezogen werden können (Abbildung). Das neue Zeitmaß heißt konforme Zeit.

¹² Diese Werte sind gerechnet für ein Modell mit

$$h^2 = 0.73 + 0.26999(1+z)^3 + 0.00001(1+z)^4$$
nach dem Ende der Inflation bei $z \sim 10^{28}$ und

$$h^2 = 10^{108} + 10^{-166}(1+z)^4$$
 vor diesem Ende.

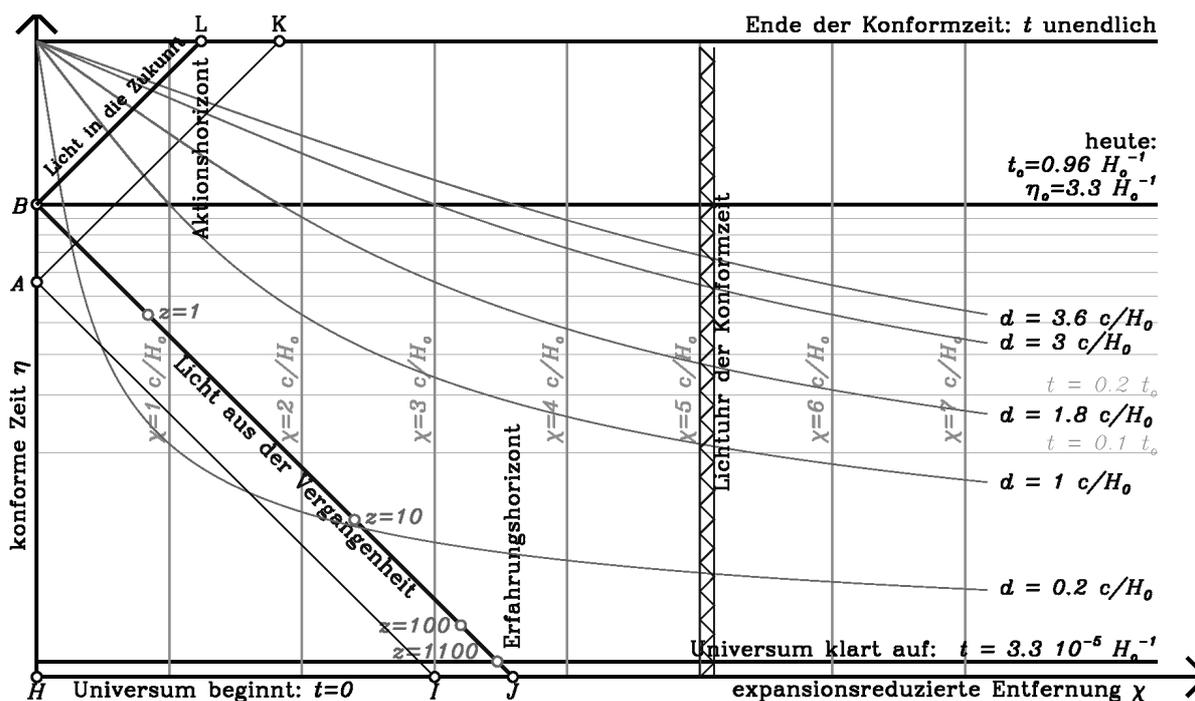


Abb. Die Mercator-Karte der Geschichte des Universums

Sehen wir uns die Karte an. Horizontal zählt die räumliche Distanz χ , vertikal die Zeit η . Aus der räumlichen Distanz ist die Expansion herausgerechnet. Eine sich mit der Expansion des Universums entfernendes Objekt zieht so eine vertikale Spur. Der Maßstab auf einer Horizontalen ist fest. Er ändert sich nur von einer Horizontalen zur andern. Der Maßstab auf den Vertikalen verändert sich mit der Zeit, er ist immer proportional dem auf der entsprechenden Horizontalen. Dadurch haben die Spuren von Lichtsignalen immer die gleiche Neigung. IA , JB , AK und BL sind solche Spuren. Die geschwungenen Linien sind Linien festen physikalischen Abstands d von der Zeitachse. Die Abbildung ist berechnet für ein Universum mit heute 70% Vakuumenergie und 30% druckfreier Materie.

Die Zeichnung berücksichtigt das Auftreten der Inflation in der extremen Frühzeit des Universums noch nicht. Die Inflation ändert an diesem Bild allerdings nur den Abstand zwischen dem Beginn der Zeit und dem Aufklaren des Universums. Diese (konforme) Zeitspanne wird sehr groß gegen die Zeitspanne, die hier dargestellt werden kann.

Wenn der Ablauf der konformen Zeit bestimmt werden soll, bedarf es der Kenntnis des tatsächlichen Verlaufs der Expansion. Wir kommen also nicht umhin, uns das Gesetz anzusehen, das diese Expansion regelt. Dieses Gesetz sieht dem Energiesatz der gewohnten Physik sehr ähnlich. Es ist aber keine Bilanz der Energien¹³, sondern eine Bilanz der Energiedichten. Sie folgt aus den Einstein'schen Gleichungen für die metrische Struktur der Welt.¹⁴ Diese Einstein'schen Gleichungen,

Krümmung der Welt = Grundkrümmung + Energiedichte ihres Inhalts

¹³ Einen Erhaltungssatz der Energie kann es nicht geben, weil dieser nur für zeitlich konstante Bedingungen gilt, die Expansion aber gerade in der Zeit veränderliche Bedingungen schafft.

¹⁴ Welt ist das von Minkowski eingeführte Synonym für die vierdimensionale Konstruktion aus Raum und Zeit, auch Raum-Zeit genannt.

führen im Falle eines homogenen und homogen expandierenden Universums auf die Friedmann-Gleichung:

$$\text{Quadrat der Expansionsrate} + \text{Krümmung des Raums} \\ = \text{Grundkrümmung der Welt} + \text{Energiedichte ihres Inhalts}$$

Diese müssen wir uns genauer ansehen.

Die Krümmung des Raums nimmt mit der Expansion wie die Krümmung der Haut eines aufgeblasenen Ballons ab, sie ist proportional $1/a^2$. Die Grundkrümmung der Welt ist zunächst eine Konstante (auch kosmologische Konstante genannt), die selbst bei fehlendem Inhalt noch vorhanden ist, also das Vakuum kennzeichnet.

Auf den ersten Blick scheint nun die Energiedichte im Universum von der Masse der Galaxien, d.h. der Sterne, d.h. der Atome, d.h. der Atomkerne, d.h. der Kernteilchen Proton und Neutron herzurühren. Auch wenn Strahlungs- und Gasdruck für irdische Maßstäbe erhebliche Werte annehmen, im Vergleich zur Energiedichte, die sich aus $E=mc^2$ ergibt, können sie vernachlässigt werden. Da die Baryonenzahl zunächst einmal in den nuklearen Prozessen erhalten bleibt, und ihre Energie bei Temperaturen weit unter 10^9 K im wesentlichen Ruhenergie ist, muss die mit ihnen verbundene Energiedichte proportional $1/a^3$ abnehmen.

G.Gamow sah als erster, dass die Strahlung bei größerer Dichte der Galaxien berücksichtigt werden muss, es also auch eine Komponente in Form von Strahlung geben muss. Diese Komponente mag heute sehr klein sein, in ferner Vergangenheit war sie dennoch ein regelrechtes Wärmebad, das in Abschnitt 5 schon angesprochen wurde.

Da der Strahlungsdruck im Verhältnis zur Energiedichte der Strahlung bedeutend ist (Druck = Energiedichte/3), leistet die Strahlungskomponente bei der Expansion Arbeit. Ist sie von den anderen Materiekomponenten entkoppelt, muss sie diese Arbeit mit der eigenen Energiedichte bezahlen, die Energiedichte nimmt also schneller als die Teilchendichte ab, nämlich proportional $1/a^4$.

Blicken wir zurück, nimmt die Strahlungsdichte schneller als alles andere zu. In der fernsten Vergangenheit bestimmt sie allein die Expansionsrate. Am Anfang der Zeit ist das Universum von Strahlung bestimmt.

Blicken wir voraus: So die Grundkrümmung der Welt positiv und von Null verschieden bleibt, wird sie allein einmal die Expansionsrate bestimmen. Das Ende der Zeit ist dann ein Universum, das expandiert, als wäre es leer. Da bei konstanter Expansionsrate sich die Volumina exponentiell (inflationär ist das Modewort dafür) vergrößern, ist das dann auch ganz real der Fall.

8. Der Schluss auf den Anfang der Zeit

In einem von Strahlung bestimmten Universum ist die die Expansionsrate proportional $1/a^2$, was einfach umgerechnet werden kann in

Zuwachs der physikalischen Zeit = Zuwachs des Quadrats des Maßstabsfaktors

Zu einer bestimmten, nicht unendlich fernen Zeit war der Maßstabsfaktor Null, die Entfernungen schrumpfen auf Null. Diesen Zeitpunkt könnten wir als Anfang unserer Zeitrechnung nehmen, wenn wir nur genau wüssten, wo er

liegt. Nach allen Beobachtungen, die wir haben, und allen theoretischen Schlüssen, die wir ziehen können, gibt es die Strahlung von dieser Entwicklungsphase nicht mehr.

In dieser Phase sollte nämlich das Vakuum einen so hohen Wert als Grundkrümmung der Welt beitragen, dass schon sehr schnell eine inflationäre Phase einsetzte, die alle Strahlung und alles andere zur Unkenntlichkeit verdünnt hat. Allerdings war dieser Vakuumbeitrag an eine hohe Temperatur der Strahlung¹⁵ gebunden. Nach der völligen Unterkühlung ist dieses Vakuum zerfallen. Die ihm entsprechende Energiedichte lud sich zurück auf die Strahlung. Wir sprechen von Rückheizung des Universums. Nur ein damals verschwindender Rest von Grundkrümmung blieb übrig. Darauf fiel die Expansionsrate schnell mit der sich verdünnenden und abkühlenden Strahlung, und das Universum bekam Zeit, all die Objekte und Strukturen zu entwickeln, die wir heute sind und heute beobachten können.

Es gibt sogar einen Beobachtungsbefund für die Zeit kurz vor der Rückheizung. Es sind dies spezielle statistische Eigenschaften der Fluktuationen, die sich durch gravitative Anziehung zu den großen Strukturen im Universum (Netzstruktur der Galaxienverteilung und der Galaxienhaufen) entwickelt haben und die in der heutigen Strahlungskomponente (der Mikrowellen-Hintergrundstrahlung) noch sichtbar sind.

Von der Zeit vor der Inflation gibt es keine Beobachtungen. Die Inflation schafft ja gerade einen Zustand des Universums, der von der Vorgeschichte völlig unabhängig ist und deshalb auch keine Spuren der Vorgeschichte enthalten kann. Was wir tun können ist allein die Suche nach Modellen, die widerspruchsfrei bekannte und unbekannte Physik extrapolieren. Das allein ist schon eine harte Nuss, die allerdings geknackt werden muss, wenn wir die dort vermuteten Grenzen unserer physikalischen Vorstellungen finden und identifizieren wollen.

Nur eine von den anstehenden Fragen soll hier besprochen werden. Auch wenn alle Entfernungen für den Zeitpunkt $t=0$ verschwinden, so ist das Universum dort nicht etwa ein einziger Punkt. Die Sprechweise „Das Universum expandiert aus einem Punkt“ ist zwar griffig und gängig, aber dennoch falsch. Die Sprechweise „Das Universum war sehr klein (10^{-35} m)“ ist nach der Beobachtungslage vermutlich falsch.¹⁶

Der Grund liegt nicht darin, dass wir mit der Mercator-Karte die Stelle $t=0$ so auseinanderziehen können. Der Grund liegt darin, dass die einzelnen Punkte auf der so auseinandergezogenen Stelle sich als verschieden entpuppen, obwohl ihr Abstand untereinander immer Null ist. Hier ist das einfachste Argument: Jedes Ereignis B zu einem späteren Zeitpunkt teilt mit seinem Lichtkegel die Ereignisse auf $t=0$ in Ereignisse, die B mit lichtschnellen Signalen erreichen (I für A und J für B in der Abbildung), in Ereignisse, die B sogar mit langsameren Signalen erreichen, und in Ereignisse, die B mit keinem Signal erreichen.

¹⁵ Strahlung bezeichnet hier die Materiekomponente mit der Zustandsgleichung

Druck = Energiedichte/3. Sie enthält also auch Teilchen mit Ruhmasse, solange nur das Energiemaß der Temperatur ($E=kT$) die Ruhenergie ($E=m_0c^2$) weit übersteigt.}

¹⁶ Damit diese Ausdrucksweise richtig ist, muss das Universum endlich sein, also positive Krümmung haben. Von einer solchen Krümmung findet sich aber in den Strukturen der Hintergrundstrahlung keine Spur.

Auch wenn die Abstände der Ereignisse auf $t=0$ alle verschwinden, ihr Einfluss auf die späteren Ereignisse unterscheidet sie deutlich. Die Ereignisse auf $t=0$, von denen uns keine Information erreicht, liegen jenseits eines Horizonts (I für A und J für B in der Abbildung), den wir Erfahrungshorizont nennen sollten (der aber Teilchenhorizont genannt wird). Mit der Zeit wird unser Erfahrungshorizont ständig größer, auch wenn sein Radius immer Null bleibt.

Was müssen wir für die Zeit vor $t=0$ vermuten? Zunächst ist $t=0$ ein Rand der Welt. Er hat singuläre Eigenschaften -- eben das Verschwinden der Abstände der Punkte auf ihm. Die Krümmung der Welt und auch die Energiedichte werden unendlich. Alles hofft nun auf das Wort der Quantentheorie, die sich hier aber der Gravitationstheorie (d.h. der Allgemeinen Relativitätstheorie) stellen muss. Da aber weder Quantentheorie noch Gravitationstheorie Lücken oder Fehler in den erreichbaren Beobachtungen zeigen, gibt es keine spezielle Richtung, in der man suchen sollte. Dementsprechend gibt es viele Vorschläge [2,5]. Seit man gelernt hat, mit Strings zu rechnen, wird das Problem nun als Nagel für diesen Hammer aufgefasst.

Nur um die Merkwürdigkeiten anzudeuten, die uns bei einer Diskussion der Zeiten vor $t=0$ begegnen können, nehmen wir den Pythagoras des Strahlungskosmos ernst. Das Eigenzeitelement

$$d\tau^2 = dt^2 - t(dx^2 + dy^2 + dz^2)$$

beschreibt für $t>0$ eine Welt mit einer Zeit- und drei Raumdimensionen. Sie ist für $t>0$ auch Lösung der Friedmann'schen Gleichungen für ein von Strahlung dominiertes Universum. Dies müssen wir für kleinste Zeiten ohnehin erwarten. Behalten wir diese Formel auch für $t<0$ bei, erhalten wir hinter dem Rand eine Welt mit vier gleichartigen Dimensionen, ob wir sie nun Zeit oder Raum nennen. Der Rand ($t=0$) ist dann die Scheidung von Raum und Zeit. Mit ihr beginnt die Geschichte des Universums.

9. Der Schluss auf das Ende der Zeit

In konformer Zeit hat unser Universum nicht nur einen Anfang, sondern auch ein Ende. Die exponentielle Expansion konstanter Rate, die uns in der Zukunft erwartet, verlängert den Weg des Photons unserer Lichtuhr so schnell, dass dieses am Ende nicht mehr folgen kann. Die Lichtuhr bleibt stecken, die Konformzeit hat ein Ende. Das scheint zunächst nur eine formale Feststellung. Sie zeigt jedoch, dass alle Prozesse, die Wechselwirkung über kosmische Distanzen verlangen, einfach einfrieren.

In einem gebundenen System -- einem Stern, einer Galaxie -- mögen die Prozesse weiterlaufen, bis die verfügbare Energie abgestrahlt ist, aber die gravitative Kondensation auf den ganz großen Skalen hört einfach auf. Nur die bereits gravitativ gebundenen Systeme können -- abgekoppelt von der Expansion -- ihre Bewegungsenergie durch Gravitationsstrahlung verlieren, in isolierten weißen Zwergen und Neutronensternen enden oder über den Umweg der Schwarzen Löcher in Hawking-Strahlung verwandelt werden. Aber alle Ergebnisse dieser Prozesse werden zerstreut und voneinander isoliert, bis auch lokal nichts mehr geschehen kann. Das Universum friert ein, alle Veränderungen enden durch Isolation.

Darüber hinaus gibt es nun auch einen Horizont in der Zukunft (K für A und L für B in der Abbildung), den man Aktionshorizont nennen sollte (der aber Ereignishorizont heißt). Er umfasst die Orte im Universum, die wir noch

erreichten, wenn wir hier und heute mit Lichtgeschwindigkeit starten könnten.¹⁷ Dieser Aktionshorizont wird -- anders als der Erfahrungshorizont -- mit der Zeit kleiner. Wir können immer mehr wissen, aber immer weniger tun.¹⁸

Literatur

1. Barbour, Julian B., *The end of time*, Weidenfeld & Nicholson, London, 1990.
2. Bojowald, Martin, *Zurück vor den Urknall. Die ganze Geschichte des Universums*, S. Fischer, Frankfurt am Main, 2009.
3. Brush, Stephen G., *Kinetische Theorie. Einführung und Originaltexte*, 2 Bände der Reihe WTB, Akademie Verlag, Berlin, 1970.
4. Hasinger, Günter, *Das Schicksal des Universums: Eine Reise vom Anfang zum Ende*, C.H.Beck, 2007.
5. Kreuzer, Maximilian: *Jenseits von Raum und Zeit*, <http://hep.itp.tuwien.ac.at/~kreuzer/strings.html>
6. Liebscher, Dierck-E., *Nagelpunkte des Universums*, Sterne und Weltraum 39, 2000, S. 530-531.
7. Liebscher, Dierck-E., *The Geometry of Time*, Wiley-VCH, Weinheim, 2005.
8. Liebscher, Dierck-E., *Einsteins Relativitätstheorie und die Geometrien der Ebene*, B.G.Teubner, Stuttgart und Leipzig, 1999, Kapitel 5, Abschnitt 3.
9. Liebscher, Dierck-E., *Cosmology*, Springer, Berlin Heidelberg New York, 2005.
10. Liebscher, *14 Milliarden Lichtjahre - was können wir davon wissen?* *Astronomie und Raumfahrt* 43, 2/2006, S. 28-31, und *Astronomie und Raumfahrt* 43, 3/2006, S. 26-29.
11. Liebscher, Dierck-E.: *Gekrümmte Welten und die Geschwindigkeit der Galaxien hinter dem Horizont*, *Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht* 60, 2007, S. 3-9.
12. Soffel, Michael, *Gravitation und der Pfeil der Zeit*, *Astronomie und Raumfahrt* 36, 1999, S. 2-5.

¹⁷ Nach dem von den Beobachtungen gestützten Modell können wir Galaxien, die heute eine Rotverschiebung $z > 1.2$ zeigen, bereits nicht mehr erreichen.

¹⁸ Wir hören immer mehr, und es verschlägt uns immer mehr die Sprache, meinen die Spötter.