

Joachim Stiller

# Die Weltenschöpfung I

Alles kommt aus dem Feuer

Copyright by Joachim Stiller  
Alle Rechte vorbehalten

# Heraklit

## Leben und Werk

"Möglicherweise noch in dem staunenswerten 6. Jahrhundert (die Datierungen sind unsicher), immer noch auf griechischem Kolonialboden außerhalb des Mutterlandes, diesmal wieder im kleinasiatischen Ionien, begegnen wir dem Denker in der Reihe der Begründer griechischer Philosophie, den viele als den tiefsten (oder rätselhaftesten) ansehen. In Ephesos, einer damals blühenden Stadt - sie barg in ihren Mauern den größten, unter die sieben Wunder der Alten Welt gerechneten ionischen Tempel -, wurde aus vornehmer Familie um das Jahr 540 v.Chr. Heraklit geboren, dem die Nachwelt den Beinamen des Dunklen verliehen hat.

Einzelgänger, Verächter der Masse und Feind der Demokratie, suchte Heraklit im Leben wie im Denken eigene, bis dahin unbetretene Wege. Seine Gedanken legte er in einer Schrift über die Natur nieder. Sie ist in einem höchst zugespitzten und eigenwilligen, an Bildern und Vergleichen reichen Stil gehalten, auf knappsten Ausdruck bedacht und wegen ihrer aphoristischen Kürze - wahrscheinlich auch absichtlich - dunkel. Jedenfalls vermitteln die mehr denn hundert einzelnen Bruchstücke, die von ihr erhalten sind, diesen Eindruck. Im hohen Alter soll sich Heraklit gänzlich abgesondert und in den Bergen, von Pflanzen sich nährend, das Leben eines Einsiedlers geführt haben - wahrscheinlich der erste Einsiedler des Abendlandes.

Gelehrtheit im Sinne bloßer Vielwisserei schätzt Heraklit gering. Sie formt nicht den Geist; könnte sie das - so sagt er mit einem Seitenhieb auf einige vor ihm lebende Denker -, so würde sie sicher Hesiod, Pythagoras und Xenophanes erleuchtet haben. Es kommt darauf an, den einen Gedanken zu finden, der das Geheimnis der Welt aufschließt.

Auch Heraklit sieht ein Einheitliches jenseits der Vielheit. Aber er sieht es nicht, wie etwa Parmenides, einfach in einem unabänderlich beharrenden Sein, und in Werden und Vielheit bloße Täuschungen. Er sieht es aber auch nicht im Gegenteil, also in einem endlosen Fließen aller Dinge. Hierin ist er oft missverstanden worden, sowohl von späteren Beurteilern wie schon von Zeitgenossen, zum Beispiel dem Parmenides, dessen Lehre vom Sein geradezu in Opposition zu Heraklit formuliert sein könnte. Heraklit hat allerdings den Ausspruch getan: "Wir können nicht zweimal in denselben Fluss steigen" (denn neue Wasser sind inzwischen herangeströmt, und auch wir selber sind beim zweiten Mal schon andere geworden); und das berühmte Wort "Alles fließt, nichts besteht" findet sich zwar nicht unter den erhaltenen Fragmenten, wird ihm aber von den antiken und den neuen Gelehrten einhellig zugeschrieben. Wohl also hat er das Geheimnis der Zeit und des ewigen Wandels tief empfunden. Aber nicht darin liegt die Größe seiner Erkenntnis, sondern erst darin, dass er hinter und in dem unaufhörlichen Fluss doch eine Einheit, nämlich ein einheitliches Gesetz, erblickt, Einheit in der Vielheit und Vielheit in der Einheit! Freilich: Der "Logos", der nach Heraklit das Geschehen in der Welt (die er für ungeschaffen hält, also von Ewigkeit her bestehend) leitet und auf den die Menschen hören sollen - kann man ein solches Wort überhaupt übersetzen? Es kann "Aussage", "vernünftige Rede", "Prinzip", "Formel" bedeuten, auch von uns Spätere als - mehr oder weniger abstraktes "Weltgesetz" gedeutet werden; Die Deutung bleibt unsicher, zumal sich Heraklit gewiss keine Gedanken über eine saubere Definition oder gar sprachkritische Durchleuchtung seiner Begriffe gemacht hat; eher ist er darin wohl ein "naiver" Denker, dass er das Wort mit der benannten Sache gleichsetzt.

Auch Heraklit scheint eine Ursubstanz angenommen zu haben, aber nicht wie die Milesier das Wasser oder die Luft. Er spricht von einem Urfeuer, aus dem nach ewigem Gesetz - "nach Maßen" -, indem es aufbrennt und wieder verlöscht, die Welt mit ihren Gegenständen hervortritt und in das sie wieder zurückfällt. Wahrscheinlich denkt er dabei nicht so sehr an Feuer im wörtlichen Sinne als vielmehr in einer allgemeineren und übertragenen Bedeutung,

wir würden etwa sagen im Sinne von Urenergie. Dafür spricht, dass das Urfeuer ihm anscheinend zugleich das Göttliche ist und er in der menschlichen Seele einen Teil desselben sieht.

Das große Gesetz, nach dem sich aus der einen Ur-Energie unablässig die Vielheit entfaltet, ist die Einheit der Gegensätze. Alle Entwicklung geschieht im polaren Zusammenspiel gegensätzlicher Kräfte. "Gott ist Tag und Nacht, Winter und Sommer, Krieg und Frieden, Überfluss und Hunger." Im Kampf zwischen Idee und Idee, Mensch und Mensch, Mann und Weib, Klasse und Klasse, Volk und Volk gestaltet sich die harmonische Ganzheit der Welt. In diesem Sinne ist Kampf, ist Krieg "aller Dinge Vater, aller Dinge König". Jedes Ding bedarf zu seinem Sein seines Gegenteils. "Sie verstehen nicht, wie es auseinandergetragen mit sich selbst im Sinn zusammengeht: gegenstrebige Vereinigung wie die des Bogens und der Leier." Darum haben diejenigen unrecht, die ein Ende allen Kampfes in einem ewigen Frieden herbeisehnen. Denn mit dem Aufhören der schöpferischen Spannung würde totaler Stillstand und Tod eintreten. Darum auch wäre es dem Menschen nicht gut, wenn er ans Ziel aller seiner Wünsche käme. Denn es ist die Krankheit, die die Gesundheit angenehm macht, nur am Übel gemessen tritt das Gute in Erscheinung, am Hunger die Sättigung, an der Mühsal die Ruhe.

Mit dieser Lehre vom Zusammengehören und Zusammenwirken des Gegensätzlichen schuf Heraklit ein erstes Modell der dialektischen Entwicklungslehre, die mehr als zwei Jahrtausende nach seinem Tode bei Hegel und im dialektischen Materialismus der Marxisten wieder auferstand und die vielleicht den bisher gelungensten Versuch des Menschengenies darstellt, dem Geheimnis des Werdens mit dem Denken beizukommen. (Es ist zu beachten, dass "Dialektik" in einem doppelten Sinne verwendet werden kann, im ursprünglichen, bei den Griechen aufgekommenen Sinn als Kunst der Beweisführung in Rede und Gegenrede - das Wort leitet sich ja von dem griechischen Wort für "sich unterreden" her; und im modernen Sinne für eine Entwicklungslehre, die das Gesetz des Fortschreitens im Fluss des Werdens in dem ständig auf anderer Ebene erneuerten Widerspiel gegensätzlicher Kräfte erblickt - wobei also die "Zwiesprache" nicht zwischen den streitenden Philosophen, sondern zwischen den widerstreitenden Kräften der Wirklichkeit selbst vonstatten geht.)

Wenn es erlaubt ist, "Logos" frei mit "alles durchwaltende Weltvernunft" wiederzugeben, an der der Mensch teilhat, in die unsere Seele nach dem Tode zurückfällt "wie ein Licht, das in der Nacht verlischt" - dann befindet sich Heraklit damit wohl auf dem Wege, der von der griechischen Göttervielfalt wegführt, hin zum Gedanken von dem einen Gott, in dem alles ruht, in dem alle Gegensätze aufgehoben sind. Wenn Heraklit diesen Schritt auch gewiss nicht bewusst vollzogen hat - sein Satz "Für (den) Gott sind alle Dinge schön und gut und gerecht; die Menschen halten das eine für gerecht, das andere für schlecht" weist wohl in diese Richtung.

Heraklit blickt nicht nur wie seine Vorgänger und Zeitgenossen auf die stoffliche Welt und ihre vermeintlichen Ursachen. Er blickt zugleich in die Tiefen der menschlichen Seele - "Mich selbst habe ich erforscht", lautet ein stolzes Wort von ihm - und ordnet den Menschen und sein Verhalten in einen metaphysischen Sinnzusammenhang ein. Nur in Platon und Aristoteles erreicht das griechische philosophische Denken eine ihm vergleichbare Tiefe und alles umgreifende Weite.

Die Nachwirkung der Heraklitischen Gedanken liegt weniger in einer besonderen Schule - eine solche hat es auch gegeben - sie reicht bis in unsere Zeit. Der von ihm eingeführte Begriff des Logos wurde zum göttlichen Wort der christlichen Theologie. Wir sagten bereits, dass seine Lehre von der Einheit der Gegensätze bei Hegel wiederkehrt. Auch die Entwicklungslehre Herbert Spencers ist ihr verwandt. Heraklits Gedanken vom Kampf als Vater aller Dinge klingt wieder auf bei Nietzsche und Darwin. Die Fragmente, die diese dunkle und von Geheimnis umwitterte Gestalt in der Geschichte der Philosophie hinterlassen hat, bestehen weiter wie niemals ausgeschöpfte tiefe Brunnen eines halbverschütteten, urtümlichen Wissens." (Störig, S.149-152)

# Wiki: Heraklit

„**Heraklit von Ephesos** (griechisch *Herákleitos ho Ephésios*, lateinisiert *Heraclitus Ephesius*; \* um 520 v. Chr.; † um 460 v. Chr.) war ein vorsokratischer Philosoph aus dem ionischen Ephesos.

Heraklit beanspruchte eine von allen herkömmlichen Vorstellungsweisen verschiedene Einsicht in die Weltordnung. Daraus ergibt sich eine nachhaltige Kritik der oberflächlichen Realitätswahrnehmung und Lebensart der meisten Menschen. Ein wiederkehrendes Thema seines Philosophierens ist neben dem auf vielfältige Weise interpretierbaren Begriff des Logos, der die vernunftgemäße Weltordnung und ihre Erkenntnis und Erklärung bezeichnet, der natürliche Prozess beständigen Werden und Wandels. In späterer Zeit wurde dieser Wandel auf die populäre Kurzformel *panta rhei* („Alles fließt“) gebracht. Des Weiteren setzte sich Heraklit mit dem Verhältnis von Gegensätzen auseinander, wie etwa von Tag und Nacht, Wachsein und Schlafen, Eintracht und Zwietracht. Diese Gegensätze sah er in einer spannungsgeladenen Einheit stehend.

Überliefert sind von Heraklits Werk nur Zitate aus späteren Texten anderer Autoren. Diese Zitate bestehen oft nur aus einem Satz und enthalten zahlreiche Aphorismen, Paradoxien und Wortspiele. Die stilistischen Eigenheiten, die fragmentarische Überlieferung und der Umstand, dass die Echtheit einiger Fragmente strittig ist, erschweren eine präzise Erfassung seiner Philosophie. Seine Thesen waren und sind daher Gegenstand kontroverser Interpretationsversuche. Wegen der nicht leicht zu entschlüsselnden Botschaften verlieh man ihm bereits in der Antike den Beinamen „der Dunkle“. Seine genauen Lebensumstände sind – wie der Aufbau seines Werkes – ungeklärt, da sich die Forschung lediglich auf Informationen von nicht zeitgenössischen, teils sehr späten Autoren stützen kann, deren Glaubwürdigkeit umstritten und in manchen Fällen offensichtlich gering ist.“ (Wiki)

## Philosophischer Horizont

„Die Philosophie Heraklits wurde – etwas einseitig – bereits in der Antike monistisch dergestalt verstanden, dass alle Dinge aus einem vernünftigen Weltfeuer hervorgehen. Aus dem Feuer entsteht nach Heraklit die Welt, die in allen ihren Erscheinungsformen eine den meisten Menschen verborgene vernunftgemäße Fügung gemäß dem Weltgesetz des Logos erkennen lässt. Alles befindet sich in einem ständigen, fließenden Prozess des Werdens, welches vordergründige Gegensätze in einer übergeordneten Einheit zusammenfasst. Aus dieser Auffassung entstand später die verkürzende Formulierung „Alles fließt“ (*panta rhei*).“ (Wiki)

## Kosmos und Feuer

„Der Begriff Kosmos steht auch im vorphilosophischen Sprachgebrauch bereits im Gegensatz zur Unordnung. Grundsätzlich kann er jede Art von Aufstellung, beispielsweise eines Heeres, oder von Gestaltung, etwa einer Sozialordnung, bezeichnen; seit den Milesiern steht der Ausdruck im philosophischen Sinn speziell für die Ordnung der Welt als eines harmonischen Ganzen. Heraklits Kosmologie ist nur schwer zu rekonstruieren. Jedenfalls spielt in seiner Vorstellung von der kosmischen Ordnung die Feuer-Theorie eine maßgebliche Rolle. In Fragment B 30 entwickelt Heraklit diese Theorie abseits der traditionellen

Göttervorstellungen, wobei er von der Annahme eines Weltfeuers ausgeht. In Fragment B 31 knüpft er daran an und beschreibt den Kosmos wie folgt:

„Diese Weltordnung, dieselbige für alle Wesen, hat kein Gott und kein Mensch geschaffen, sondern sie war immerdar und ist und wird sein ewig lebendiges Feuer, nach Maßen erglühend und nach Maßen erlöschend.

Feuers Wandlungen: erstens Meer, die Hälfte davon Erde, die andere Glutwind. [...] Es [das Feuer] zerfließt als Meer und erhält sein Maß nach demselben Wort [Gesetz], wie es galt, ehe denn es Erde ward.“

Heraklit sieht in Fragment B 30 den Kosmos als materielle Ausformung des Weltfeuers, nicht im Sinne eines Schöpfungsmythos geschaffen und von ewigem Fortbestand. Das Weltfeuer selbst schlägt dabei Fragment B 31 zufolge materiell in andere Elemente um, aus denen sich der sichtbare Kosmos zusammensetzt. Dabei wird schrittweise das heiße und trockene Weltfeuer zunächst in sein Gegenteil verwandelt, in feuchtes und kaltes Wasser. Darin verlöscht das Weltfeuer gänzlich, sodass das Wasser in diesem Stadium das einzige kosmische Element darstellt. Später geht das Meer in andere gegenteilige Qualitäten über, teils in Erde und teils in Glutwind. Der Glutwind lässt die Gestirne als sichtbares Himmelsfeuer aus verdunstetem Wasser entstehen, das von der Erde aufsteigt, sich wie in einem umgestülpten Nachen fängt und sich in Form der wahrnehmbaren Himmelskörper entzündet. Der gesamte Vorgang läuft auch in der umgekehrten Richtung ab. Dadurch entzündet sich das Feuer erneut und der Zyklus des Kosmosgeschehens kann neu einsetzen. Während aller Veränderungen bewahrt der Kosmos so wie der Fluss in den Fluss-Fragmenten ein Gleichgewicht der transformierten Anteile.

Indem Heraklits Lehre bestimmte Gestalten und Prozesse mit der Spannung von Gegensätzlichem und Gegenläufigem verbindet und in einem dynamischen Gleichgewicht aufgehoben sieht, erschließt sich auch sein metaphysisches Interesse am Feuer: „Deshalb wurde das ‚nach Maßen‘ entflammende und nach gleichen Maßen verlöschende Feuer in Analogie zur bewegenden und belebenden Kraft der Psyche zu einem sinnlichen Symbol für einen in sich bewegten und geordneten Kosmos und für eine Natur, die sich selbst individuell organisierte und gestaltete.“ Das aus dem Mythos geläufige Bild von der Sonne als kreisförmig sich bewegendem Feuerball konnte als sichtbares Zeichen einer unermesslichen Kraftquelle gedeutet werden, „die gleichwohl an sich hielt, und ohne die das kosmische und terrestrische Geschehen nicht zu begreifen war.“

Feuer (*πῦρ*), das in der Tradition der ionischen Naturphilosophen als Urstoff (Arche) fungiert, ist bei Heraklit auch als Metapher für den Logos zu verstehen, dessen Dynamik die Welt durchwaltet und dessen Wandlung ihr Seinsprinzip bildet. So charakterisiert er das Feuer als „ewig lebendig“ (*αἰζῶον*) und „vernünftig“ (*φρόνιμον*). Heraklits Feuer-Theorie steht außerdem auch für die Vorstellung, dass sich „alles in einem“ finde, da aus allem Feuer und aus Feuer alles andere hervorgehen soll. Feuer als die kosmologisch-physikalische Form des Logos anzusehen sei denen unmittelbar einsichtig, die im Logos ein aktiv wirkendes Prinzip sehen: Wie das Feuer habe auch der Logos das Weltgeschehen zu steuern.“ (Wiki)

# Wiki: Die Urknalltheorie

„Der **Urknall** ist nach dem Standardmodell der Kosmologie der Beginn des Universums. Im Rahmen der **Urknalltheorie** wird auch das frühe Universum beschrieben, das heißt, die zeitliche Entwicklung des Universums nach dem Urknall.

Der Urknall bezeichnet keine Expansion in einem bestehenden Raum, sondern die gemeinsame Entstehung von Materie, Raum und Zeit aus einer ursprünglichen Singularität. Da keine konsistente Theorie der Quantengravitation existiert, gibt es in der heutigen Physik keine allgemein akzeptierte Theorie zum Zustand des Universums zu sehr frühen Zeiten, als seine Dichte der Planck-Dichte entsprach. Daher ist der Begriff „Urknall“ die Bezeichnung eines formalen Punktes, der durch Betrachtung des kosmologischen Modells eines expandierenden Universums über den Gültigkeitsbereich der zugrunde liegenden allgemeinen hinaus erreicht wird. Nach dem kosmologischen Standardmodell ereignete sich der Urknall vor etwa 13,7 Milliarden Jahren.

Als Begründer der Theorie gilt der Theologe und Physiker Georges Lemaître, der 1931 für den heißen Anfangszustand des Universums den Begriff „primordiales Atom“ oder „Uratom“ verwendete. Der Begriff Urknall (engl. *Big Bang*, wörtlich also *Großer Knall*) wurde von Sir Fred Hoyle geprägt, der als Kritiker und Vertreter der konkurrierenden Steady-State-Theorie diese Theorie unglaubwürdig erscheinen lassen wollte. Die Steady-State-Theorie verlor in den 1960er Jahren an Zustimmung, als astronomische Beobachtungen zunehmend die Urknalltheorie bestätigten, und wird heute nur noch von einer Minderheit der Kosmologen untersucht“ (Wiki-Artikel zum Urknall)

## Übersicht

„Mit dem Begriff Urknall ist der Anfangspunkt der Entstehung von Materie und Raumzeit gemeint. Ein solcher Anfang ergibt sich aus kosmologischen Theorien, denen zufolge sich das Universum dauerhaft ausdehnt. Diese von Astronomen beobachtete Expansion des Universums hat zum Begriff des Urknalls geführt: Die beobachtete Auseinanderbewegung der Galaxien ergibt zurückgerechnet einen Zeitpunkt, an dem diese auf ein enges Raumgebiet konzentriert waren. Zum Zeitpunkt des Urknalls ist die Energiedichte formal unendlich. Da physikalische Theorien die Existenz von Raum, Zeit und Materie voraussetzen, lässt sich der eigentliche Urknall mit ihnen nicht beschreiben. Die Quantentheorie und die allgemeine Relativitätstheorie haben weitere Voraussetzungen, die direkt nach dem Urknall nicht erfüllt waren. Sie eignen sich daher erst für eine Beschreibung ab einem Zeitpunkt, zu dem der Urknall deutlich mehr als eine Planckzeit (ca.  $5,391 \cdot 10^{-44}$  Sekunden) zurückliegt. (Wiki-Artikel zum Urknall)

## Grundannahmen

Die Urknalltheorien basieren auf zwei Grundannahmen: Die erste Annahme ist, dass die Naturgesetze universell sind und sich also das Universum mit den Naturgesetzen beschreiben lässt, die heute nahe der Erde gelten. Die zweite Annahme lautet, dass das Universum an jedem Ort (aber nicht zu jeder Zeit) in alle Richtungen für große Entfernungen gleich aussieht. Diese Annahme wird als Kopernikanisches Prinzip oder kosmologisches Prinzip bezeichnet. Im Folgenden werden diese Annahmen und grundlegende Folgerungen daraus erläutert.

## Universalität der Naturgesetze

Die Annahme universeller Naturgesetze ist unabdingbar für eine Beschreibung des gesamten Universums. Alle bisherigen astronomischen Beobachtungen weisen auch auf eine Allgemeingültigkeit der Naturgesetze hin.

Aus dieser Universalität der Naturgesetze folgt, dass sich die Entwicklung des Universums mittels der allgemeinen Relativitätstheorie beschreiben lässt, welche die derzeit mehrheitlich anerkannte Theorie der Gravitation und Raumzeit ist. Dabei ist allerdings zu beachten, dass die allgemeine Relativitätstheorie nicht mit den Theorien der Quantenphysik vereinbar ist. Da bei sehr großer Materiedichte und damit sehr großer Raumzeitkrümmung Quanteneffekte zu erwarten sind, unterliegt daher die Beschreibung des frühen Universums Einschränkungen. Der Punkt des Urknalls selbst und eine sehr kurze, darauf folgende Zeitspanne von einer Planck-Zeit ist mit den derzeitigen Theorien nicht beschreibbar, und der Begriff „Urknall“ kann als Bezeichnung für diesen unverstandenen Teil verstanden werden.

## Kosmologisches Prinzip

Das kosmologische Prinzip besagt, dass das Weltall zur selben Zeit an jedem Raumpunkt und auch in alle Richtungen für große Entfernungen gleich aussieht, und wird auch (räumliche) *Homogenität* genannt; die Annahme, dass es in jeder Richtung gleich aussieht, heißt (räumliche) *Isotropie*. Ein Blick zum Sternenhimmel mit bloßem Auge zeigt sofort, dass das Universum in der näheren Umgebung der Erde nicht homogen und isotrop ist, denn es gibt unregelmäßig verteilte Sterne. Auf größerer Skala bilden die Sterne Galaxien, die allerdings auch sehr ungleichmäßig verteilt sind und Galaxienhaufen bilden. Auf noch größerer Skala ist eine wabenartige Struktur erkennbar, die aus sogenannten Filamenten und Voids besteht.

Wendet man das kosmologische Prinzip auf die allgemeine Relativitätstheorie an, vereinfachen sich die einsteinschen Feldgleichungen zu den sogenannten Friedmann-Gleichungen. Die Friedmann-Gleichungen beschreiben demzufolge ein homogenes, isotropes Universum. Zur Lösung der Gleichungen geht man vom heutigen Zustand des Universums aus und verfolgt die Entwicklung rückwärts in der Zeit. Die exakte Lösung hängt insbesondere von den gemessenen Werten der Hubble-Konstante sowie diverser Dichteparameter ab, die den Masse- und Energieinhalt des Universums beschreiben. Man findet dann, dass das Universum früher kleiner war (Expansion des Universums), gleichzeitig war es heißer und dichter. Formal führt die Lösung auf einen Zeitpunkt, zu dem der Wert des Skalenfaktors verschwindet, also das Universum keine Ausdehnung hatte und die Temperatur und Dichte unendlich groß werden. Dieser Zeitpunkt wird als „Urknall“ bezeichnet, er ist eine formale Singularität der Lösung der Friedmann-Gleichungen. Damit wird allerdings keine Aussage über die physikalische Realität einer derartigen Anfangssingularität gemacht, da die Gleichungen der klassischen Physik nur einen begrenzten Gültigkeitsbereich haben und nicht mehr anwendbar sind, wenn Quanteneffekte eine Rolle spielen, wie das im sehr frühen, heißen und dichten Universum angenommen wird. Zur Beschreibung der Entwicklung des Universums zu sehr frühen Zeiten ist eine Theorie der Quantengravitation erforderlich.

# Das frühe Universum

Den Friedmann-Gleichungen zufolge war die Energiedichte des Universums in seiner Frühphase sehr hoch. Das bedeutet, dass auch die Energien der Teilchen im Mittel sehr hoch waren. Die sehr frühe Phase des Universums ist daher Gegenstand von Theorien, die nicht mit Laborexperimenten überprüft werden können.

## Vereinheitlichte Feldtheorien

Der Beginn des mit der allgemeinen Relativitätstheorie beschreibbaren Universums folgt im Rahmen einer Theorie einer einzelnen Urkraft dem Zeitpunkt, an dem sich die Gravitation von den anderen Grundkräften trennt. Die Eigenschaften einer solchen Urkraft und eines Universums, das von einer solchen beherrscht wird, sind unbekannt. Ein solches Urkraft-Modell geht deutlich über eine Theorie der Quantengravitation hinaus, und die derzeit nicht gegebene Existenz einer allgemein akzeptierten Theorie der Quantengravitation kann daher als Grundlage für die Entwicklung einer solchen Theorie betrachtet werden. Im Rahmen der Stringtheorie besteht die Hoffnung, eine universelle Theorie zu entwickeln, die eine Quantengravitation ebenso umfassen würde wie Theorien aller Grundkräfte. Ob und in welchem Sinne in einer solchen Theorie alle vier Grundkräfte vereinheitlicht wären, ist unklar.

Die anderen drei Grundkräfte, die starke Kernkraft, die schwache Kernkraft und die elektromagnetische Kraft, sind im Rahmen der Quantenfeldtheorie beschrieben. Mögliche vereinheitlichte Theorien lassen sich daher auf Basis der existierenden Theorien entwickeln. Allerdings reichen derzeitige Experimente nicht aus, um solche Theorien ausreichend zu prüfen. Aufgrund der Tatsache, dass es eine vereinheitlichte elektroschwache Wechselwirkung gibt und aufgrund anderer theoretischer Argumente vermuten jedoch viele Physiker, dass eine solche Große vereinheitlichte Theorie (GUT: Grand Unified Theory) existiert.

Die hohe Temperatur des frühen Universums hatte zur Folge, dass sich ständig verschiedene Teilchensorten ineinander umwandelten. Bei ausreichend hoher Temperatur verlaufen diese Umwandlungsreaktionen gleich häufig in beiden Richtungen ab, so dass sich thermisches Gleichgewicht einstellt. Durch die Expansion des Universums nimmt die Temperatur mit der Zeit ab; dies führt dazu, dass verschiedene Reaktionen „ausfrieren“, wenn die Temperatur einen gewissen, für jede Reaktion charakteristischen Schwellenwert unterschreitet. Dies bedeutet, dass die Reaktion nur noch in einer, nämlich der (nach chemischen Sprachgebrauch) „exothermen“ Richtung abläuft, während für die endothermen Rückreaktion die nötige Energie fehlt. Dadurch kommt es nach und nach zum Aussterben von Teilchensorten von hoher Masse. Angewandt auf eine große vereinheitlichte Wechselwirkung würde das bedeuten, dass in der sehr frühen Phase des Universums unbekannte Teilchen mit sehr großer Masse existierten, die in bekannte leichtere Teilchen zerfielen, welche dann wieder zu den schweren Teilchen „verschmolzen“. Erst als die mittlere Teilchenenergie unter die Massenenergie  $E = mc^2$  der unbekannteren schweren Teilchen abgesunken war, konnten sie nicht mehr durch Verschmelzung leichterer Teilchen erzeugt werden und „starben aus“. Die Unterschreitung dieser Grenztemperatur und das damit verbundene Aussterben der massiven Teilchen wird als spontane Symmetriebrechung interpretiert.

Es gibt im Universum beobachtete Asymmetrie zwischen Materie und Antimaterie, das heißt während es offensichtlich Materie gibt, existiert nur sehr wenig Antimaterie im Universum.

Da die bekannten Wechselwirkungen gleich viel Materie und Antimaterie erzeugen, liefern die bekannten Theorien noch keine Erklärung für dieses Phänomen (Stand 2011). Ein potentiell erklärungsmodell liefern die Sacharowkriterien, die am einfachsten durch eine CP-verletzung in einer GUT erfüllt werden können. Durch das Ausfrieren von Reaktionen, die die Baryonenzahl nicht erhalten, kann dann zu Ende der GUT-Ära ein kleiner Überschuss von Materie im Vergleich zu Antimaterie entstehen, der nach der Materie-Antimaterie-Zerstrahlung die heutige, fast vollständig aus Materie bestehende Welt bildet (vergleiche dazu auch Baryogenese und Leptogenese).

## **Inflationstheorie**

Nach dem Standardmodell der Kosmologie wurde die Planck-Ära gefolgt von einer Epoche, in der das Universum sehr schnell exponentiell expandierte. Während dieser sogenannten Inflation dehnte sich das Universum innerhalb von  $10^{-33}$  s bis  $10^{-30}$  s um einen Faktor zwischen  $10^{30}$  und  $10^{50}$  aus. Diese überlichtschnelle Ausdehnung des Universums steht nicht im Widerspruch zur Relativitätstheorie, da diese nur eine überlichtschnelle Bewegung *im Raum*, nicht jedoch eine überlichtschnelle Ausdehnung *des Raumes selbst* verbietet. Der Bereich, der dem heute beobachtbaren Universum entspricht, hätte dabei der Theorie zufolge von einem Durchmesser, der den eines Protons weit unterschreitet, auf etwa 10 cm expandieren müssen.

Die genauen Details der Inflation sind unbekannt, allerdings gelten die Messung der Temperaturschwankungen der kosmischen Hintergrundstrahlung durch den WMAP-Satelliten als starkes Indiz dafür, dass eine Inflation mit bestimmten Eigenschaften stattgefunden hat. Mittels der Messergebnisse des Planck-Weltraumteleskops könnte es möglich werden, genauere Erkenntnisse über die Inflationsepoche zu gewinnen.

Es gibt eine Vielzahl von Modellen zur Beschreibung der Inflation. Am verbreitetsten sind Modelle mit einem oder mehreren Skalarfeldern, die als Inflatonfelder bezeichnet werden, als Ursache der schnellen Expansion. Ebenfalls unklar ist die Ursache für das Ende der Inflation. Eine mögliche Erklärung hierfür sollen Slow-Roll-Modelle bieten, in denen das Inflatonfeld ein energetisches Minimum erreicht und die Inflation deshalb endet; und GUT-Modelle, in denen das Ende der Inflation durch Brechung der GUT-Symmetrie aufgrund der Abkühlung des Universums und damit ausgelösten Zerfall des Inflatonfeldes erklärt wird. Durch die enorme Expansion des Universums hätte sich dieses auf weit unter 1 K abkühlen müssen, weshalb alle endothermen Teilchenreaktionen zum Erliegen gekommen wären. Deshalb wird am Ende der Inflationsphase ein „Reheating“ genannter Prozess angenommen, der durch die Brechung der GUT-Symmetrie und dem damit verbundene Teilchenzerfall diese großen Energien hätte liefern können.

Eine Inflationsphase kann mehrere kosmologische Beobachtungen erklären:

- die globale Homogenität des Kosmos (Horizontproblem),
- die geringe Krümmung des Raumes (Flachheitsproblem),
- die Tatsache, dass keine magnetischen Monopole beobachtet werden,
- die großräumigen Strukturen im Kosmos wie Galaxien und Galaxienhaufen,
- das bereits erwähnte Spektrum der Temperaturschwankungen der kosmischen Hintergrundstrahlung.

# Entwicklung des Universums

Die Zeit nach der Inflation und der spekulativen Brechung einer möglichen GUT-Symmetrie, sowie der elektroschwachen Symmetrie kann mit den heute (2011) bekannten physikalischen Theorien beschrieben werden. Das Verhalten des Universums ab dieser Phase ist durch Beobachtungen relativ weitgehend festgelegt und unterscheidet sich für die verschiedenen Urknall-Modelle kaum.

## Primordiale Nukleosynthese

Als primordiale Nukleosynthese wird die Entstehung von Atomkernen im frühen Universum bezeichnet. Nach Ende der Inflation, also nach etwa  $10^{-30}$  s sank die Temperatur auf  $10^{25}$  K ab. Es bildeten sich Quarks und Anti-Quarks, die Bausteine der heutigen schweren Teilchen (Baryogenese). Die Temperatur war aber so hoch und die Zeiten zwischen zwei Teilchenstößen so kurz, dass sich noch keine stabilen Protonen oder Neutronen bildeten, sondern ein so genanntes Quark-Gluonen-Plasma aus annähernd freien Teilchen entstand. Die Zeit bis zur Bildung stabiler Hadronen wird auch *Quark-Ära* genannt.

Nach  $10^{-6}$  s lag eine Temperatur von  $10^{13}$  K vor. Quarks konnten nicht mehr als freie Teilchen existieren, sondern vereinigten sich zu Hadronen, den Bausteinen der Atomkerne. Nach  $10^{-4}$  s war die Temperatur auf  $10^{12}$  K gesunken, so dass keine Proton-Antiproton- oder Neutron-Antineutron-Paare mehr gebildet wurden. Die meisten Protonen und Neutronen wurden bei Stößen mit ihren Antiteilchen vernichtet – bis auf einen kleinen Überschuss von einem Milliardstel. Die Dichte sank auf  $10^{13}$  g/cm<sup>3</sup>. Mit abnehmender Temperatur zerfielen die schwereren Hadronen und es blieben schließlich Protonen und Neutronen sowie ihre Antiteilchen übrig. Durch ständige Umwandlungen von Protonen in Neutronen und umgekehrt entstand auch eine große Zahl von Neutrinos. In dieser sogenannten *Hadronen-Ära* gab es gleich viele Protonen wie Neutronen, da sie ineinander umgewandelt werden konnten. Nach 1 s war eine Temperatur von  $10^{10}$  K erreicht. Ab dieser Temperatur konnten Protonen nicht mehr in Neutronen umgewandelt werden.

Erst nach 10 Sekunden, bei Temperaturen unterhalb von  $10^9$  K, vereinigten sich Protonen und Neutronen durch Kernfusion zu ersten Deuterium-Atomkerne. Diese wurden zum größten Teil in Helium-4-Kerne umgewandelt. Nach etwa 3 Minuten hatte die Temperatur und Dichte der Materie soweit abgenommen, dass die Kernfusion zum Erliegen kam. Die übriggebliebenen freien Neutronen waren nicht stabil und zerfielen im Verlauf der nächsten Minuten in Protonen und Elektronen. Insgesamt bildeten sich in den ersten drei Minuten zu 25 % Helium-4 (<sup>4</sup>He) und 0,001 % Deuterium sowie Spuren von Helium-3 (<sup>3</sup>He), Lithium und Beryllium. Die restlichen 75 % stellten Protonen, die späteren Wasserstoffatomkerne.

Alle schwereren Elemente entstanden erst später im Inneren von Sternen. Die Temperatur war immer noch so hoch, dass die Materie als Plasma vorlag, einem Gemisch aus freien Atomkernen, Protonen und Elektronen, mit thermischer Strahlung im Röntgenbereich.

## Stark gekoppeltes Plasma

Für Neutrinos, die kaum mit anderen Teilchen wechselwirken, war die Dichte nach  $10^{-4}$  s niedrig genug – sie befanden sich nicht mehr im thermischen Gleichgewicht mit den anderen Teilchen, das heißt, sie *entkoppelten*. Nach 1 s war eine Temperatur von  $10^{10}$  K erreicht. Jetzt vernichteten sich auch Elektronen und Positronen – bis auf den Überschuss von einem

Milliardstel an Elektronen. Damit war die Bildung der Bausteine der Materie, aus der sich der Kosmos auch heute noch zusammensetzt, weitgehend abgeschlossen. Das Universum war nun gefüllt mit einem stark wechselwirkenden Plasma aus Elektronen, Photonen („Lichtteilchen“) und Atomkernen, vor allem Protonen. Außerdem gab es Neutrinos, die vor allem durch die Gravitation mit dem heißen Plasma wechselwirkten. Außerdem wird im Rahmen des kosmologischen Standardmodells angenommen, dass es außerdem eine große Menge dunkler Materie gab, die ebenfalls nur durch die Gravitation mit dem Plasma wechselwirkte.

Es dauerte etwa 400.000 Jahre, bis die Temperatur ausreichend abgesunken war, dass sich stabile Atome bildeten und Licht große Distanzen zurücklegen konnte, ohne absorbiert zu werden. Die *mittlere freie Weglänge* von Photonen vergrößerte sich extrem, das Universum wurde also durchsichtig, genauer gesagt nahm seine *optische Dichte* sehr rapide ab. Diese Entkopplung des Lichts dauerte etwa 100.000 Jahre. In dieser Zeitspanne waren einige Regionen des Universums bereits soweit abgekühlt, dass sie durchsichtig waren, während in anderen Regionen noch heißes Plasma vorherrschte. Da es zur Zeit der Entkopplung sehr viel mehr Photonen als Protonen im Universum gab, lag die Temperatur des Universums deutlich niedriger als die Ionisationsenergie des Wasserstoffs  $k_B T \approx 13,6 \text{ eV}$ , wobei  $k_B$  die Boltzmann-Konstante ist, nämlich bei etwa  $k_B T \approx 0,3 \text{ eV}$ , was einer Temperatur von etwa 4000 K entspricht. Das bedeutet, dass das Maximum der Strahlungsintensität zu dieser Zeit im sichtbaren Spektrum lag. Diese Strahlung ist noch heute als kosmische Hintergrundstrahlung messbar. Allerdings ist sie aufgrund der kosmologischen Rotverschiebung inzwischen sehr viel langwelligere Mikrowellenstrahlung und entspricht einer Temperatur von 2,73 K.

Die Dynamik des Plasmas ist entscheidend für die Entstehung der Temperaturfluktuationen der Hintergrundstrahlung und der Bildung von Materiestrukturen. Das Verhalten des plasmagefüllten Universums kann im Rahmen der kosmologischen Störungstheorie mittels der Boltzmann-Gleichung beschrieben werden. Damit lassen sich gewisse Grundcharakteristika des Spektrums der Temperaturfluktuationen erklären. Insbesondere kommt es in dem Plasma zu Druckwellen, also gewissermaßen Schallwellen, die bestimmte charakteristische Peaks im Spektrum der Temperaturfluktuationen verursachen. Dass diese Peaks vom WMAP-Satelliten mit großer Genauigkeit gemessen werden konnten, ist ein unterstützendes Indiz für diese Theorien. Die Entstehung großräumiger Strukturen wird qualitativ damit erklärt, dass sich dunkle Materie an Orten sammelt, wo auch das Plasma dichter ist und damit Dichteungleichgewichte so sehr verstärkt, dass sich die Materie schließlich fast ausschließlich in relativ kleinen Bereichen des Universums sammelt.

## Strahlungs-Ära und Materie-Ära

Die Friedmann-Gleichungen basieren auf dem Materiemodell des perfekten Fluids. In diesem Modell wird die Materie durch zwei Zustandsgrößen, nämlich Energiedichte  $\rho$  und Druck  $p$  beschrieben. Der Zusammenhang zwischen Energie und Druck wird durch eine Zustandsgleichung  $\rho = w p$  beschrieben. Die wichtigsten Fälle für die üblichen Modelle des

Universums sind Strahlung mit  $w = \frac{1}{3}$ , massive Teilchen, oft als „Staub“ bezeichnet, mit  $w = 0$  und eine kosmologische Konstante mit  $w = -1$ . Für die verschiedenen Arten der Materie ist die Abhängigkeit der Energiedichte vom Skalenfaktor  $a(t)$  sehr unterschiedlich, nämlich  $\rho(t) \sim a^{-3(1+w)}(t)$ . Die unterschiedliche Zeitabhängigkeit bei Strahlung und massiven Teilchen lässt sich auch anschaulich verstehen; bei Strahlung nimmt zusätzlich zum Abfallen der Anzahldichte der Photonen (infolge der Expansion des Raumes) die Wellenlänge

der einzelnen Photonen durch die kosmologische Rotverschiebung zu. Dies sorgt dafür, dass die Energiedichte der Strahlung schneller abnimmt, als die der massiven Materie, so dass ein Universum, das zu Beginn strahlungsdominiert war, nach einiger Zeit durch massive Teilchen dominiert wird, bis zuletzt eine eventuelle kosmologische Konstante vorherrschen würde.

Den Urknall-Modellen zufolge, stellte (elektromagnetische) Strahlung nach der Inflation den Hauptanteil der Energiedichte im Kosmos. Zu einem Zeitpunkt von etwa 70.000 Jahren nach dem Urknall waren die Energiedichten von Strahlung und Materie gleich, danach bestimmte die massive Materie die Dynamik des Universums. Man spricht vom Ende der strahlungsdominierten Ära und dem Beginn der materiedominierten Ära.

Joachim Stiller

Münster, 2013

Ende

[Zurück zur Startseite](#)