

# Physikaufgabe 46

[Home](#) | [Startseite](#) | [Impressum](#) | [Kontakt](#) | [Gästebuch](#)

**Aufgabe:** Erklären Sie, warum es im Zeitpunkt des Urknalls keine Kausalität gab.

**Lösung:** Um zu verstehen, wie es zu einem Urknall kommt, muß man keine Eigenschaften von Quantenteilchen anführen, sondern lediglich akzeptieren, daß es einen Energieerhaltungssatz gibt, der nicht verletzt werden kann, und daß Masse nach dem Massenerhaltungssatz weder erzeugt noch zum Verschwinden gebracht werden kann, auch wenn sie zwischenzeitlich in Energie umgewandelt wird. Wenn man das akzeptiert hat, versteht man auch, daß nichts erschaffen werden kann, was nicht schon da war. Ein Weltraum entsteht, wenn die Gravitation ihn freigibt, und er verliert sich, wenn die Gravitation ihn einfängt. Dazwischen liegt lediglich eine Schwelle, die überschritten werden muß, ein sogenannter Potentialberg. Alles, was dazwischen liegt, sind periodische Schwingungen zwischen sichtbarer und dunkler Materie. Die Periodendauer einer Schwingung entspricht dem maximal möglichen Alter des Universums. Probleme bereitet allenfalls noch die Suche nach einer ersten Ursache, die es aber nicht gibt, weil die anregende Kraft fehlt. In einem reibungsfrei schwingenden System bedarf es keiner Anregung. Jede Fluktuation wäre in der Lage, es anzuregen. Fluktuationen von Raum und Zeit sind fundamentale Eigenschaften der Natur. In der realen Welt wäre diese Anregung freilich nicht wegzudenken, aber in dieser nimmt die Entropie auch entweder zu oder ab. Den Zustand mit der Entropie Null gibt es nur während des Urknalls. Er ist gekennzeichnet dadurch, daß sich Ursache und Wirkung gegenseitig aufheben. Quantenmechanische Fluktuationen setzen die Kausalität in Gang. Jegliche Kausalität kommt daher nicht aus dem Nichts, sondern aus einem Etwas. Lediglich die Erinnerung an das Frühere ist erloschen, es wurde irreversibel überschrieben. Denn erst wenn die Zeit zu laufen begonnen hat, kann man von einer eigentlichen Kausalität reden, die dann endet, wenn die Zeit abgelaufen ist. In unserem Model fängt die Zeit jedesmal wieder von vorne an, wenn sie einmal aufgehört hat. Davor gibt es keine Jetztzeit und danach ebenfalls keine. Raum und Zeit sind ein Erzeugnis der Allgemeinen Relativität und erst die Voraussetzung für jegliche Kausalität. Die Frage nach einer ersten Ursache stellt sich daher nicht, weil sie eine Folge der Naturgesetze selbst ist.

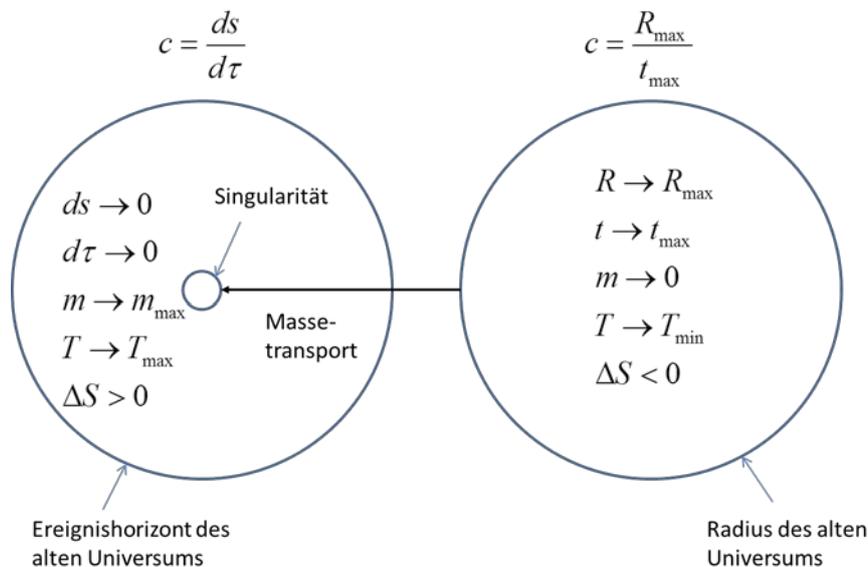


Abbildung 1. Zustand des gegenwärtigen Universums

## Physikaufgabe 46

---

Das Universum ist das Ergebnis sowohl eines relativistischen als auch eines quantenmechanischen Effekts. Seit dem Urknall breitet sich das Licht mit Lichtgeschwindigkeit radial in alle Richtungen des Raums aus. An einem beliebigen Punkt des Universums, z.B. im Mittelpunkt unserer Galaxis, die sich mit der Geschwindigkeit  $v$  von dieser Singularität entfernt<sup>1</sup>, gelte die Zeit  $t$ . Dann gilt für das differentielle Zeitelement der Eigenzeit  $\tau$  im System der Singularität nach der Speziellen<sup>2</sup> Relativitätstheorie die Relation

$$d\tau = dt \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}},$$

wobei  $c$  die Vakuumlichtgeschwindigkeit ist. Für das differentielle relativistische Wegelement  $ds$ , eine Invariante der Bewegung, gilt

$$ds^2 = c^2 dt^2 - \Delta x^2 - \Delta y^2 - \Delta z^2,$$

wobei die ungestrichenen Koordinaten  $x$ ,  $y$  und  $z$  sich auf das System unserer Galaxis beziehen<sup>3</sup>. Das gestrichene System markiert die von uns sich wegbewegende Singularität. Da sich relativistische Effekte nur in Bewegungsrichtung auswirken, gilt zwischen einem Abstand  $\Delta x$  im nichtbewegten und demselben Abstand  $\Delta x'$  im bewegten Koordinatensystem die zur Eigenzeit äquivalente Relation

$$\Delta x' = \Delta x \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}.$$

Betrachten wir zunächst Abb. 1. Auf der rechten Seite in diesem Bild ist schematisch unser gegenwärtiges Universum dargestellt, als Kreisfläche mit Radius  $R$ . Der linke Teil des Bildes zeigt das Universum unmittelbar vor dem Urknall, dargestellt als Schwarzes Loch mit einer Singularität in seiner Mitte.<sup>4</sup> Der Ereignishorizont hat demnach die gleiche Größe wie die finale Ausdehnung des expandierenden Universums unmittelbar vor dem nächsten Urknall, da sich dieselbe Masse in ihm befindet. In unserer vereinfachten Betrachtung spielt es keine Rolle, wie viele Singularitäten oder Schwarze Löcher sich im All insgesamt befinden, wir fassen sie daher alle in einem einzigen zusammen.<sup>5</sup> Unmittelbar nach dem Urknall sollte sich noch kein Schwarzes Loch im All befinden, da sich noch keine Sterne gebildet haben. Nach und nach entstehen diese aber, vor allem im Zentrum massereicher Galaxien. Dabei findet ein kontinuierlicher Massetransport von sichtbarer Materie in unsichtbare bzw. dunkle Materie statt. Dieser Prozeß der Umwandlung von sichtbarer in dunkle Materie hält so lange an, bis alle sichtbare Materie in dunkle umgewandelt ist. Vergleichen wir diese beiden Welten, so sehen wir, daß in der sichtbaren Welt die Zeit zunimmt, wobei auch der Radius des Alls sich

---

<sup>1</sup> Oder die Singularität umgekehrt von unserer Galaxis

<sup>2</sup> Wir verwenden hier vereinfachend die Spezielle anstatt die Allgemeine Relativitätstheorie

<sup>3</sup> In der relativistischen Notation sind die Ortsdifferenzen nicht mit den quantenmechanischen Unschärfen zu verwechseln

<sup>4</sup> Diese Singularität ist natürlich nicht maßstäblich dargestellt, sondern als kleiner Kreis, im Idealfall wäre sie ein Punkt

<sup>5</sup> Wie wir ja wissen, können Schwarze Löcher miteinander verschmelzen, wobei sie immer massereicher werden

## Physikaufgabe 46

---

seinem Grenzwert bei maximaler Ausdehnung nähert. Entsprechend nimmt die sichtbare Masse ab, weil sie in dunkle Materie verwandelt wird. Die Temperatur sollte auf null zurückgehen, was allerdings nach dem Dritten Hauptsatz der Thermodynamik aus energetischen Gründen nicht möglich ist. Erreichbar ist lediglich ein minimaler Temperaturwert, da die Entropie nicht wirklich Null werden kann. Betrachten wir das Universum als einatomiges ideales Gas, so ist seine Entropieänderung gegeben durch

$$\Delta S = Nk \ln \frac{T^{3/2}V}{T_0^{3/2}V_0},$$

wobei  $k$  die Boltzmann-Konstante ist,  $N$  die Zahl der Wasserstoffatome und  $V$  das Volumen des Raums. Legen wir ein Kugelvolumen zugrunde und ersetzen das Volumen durch den Radius  $R$ , so lautet die Entropieänderung

$$\Delta S = \frac{3}{2} Nk \ln \frac{TR^2}{T_0 R_0^2},$$

wobei  $T_0 = T_{\max}$  und  $R_0 = R_{\max}$  den Zustand des Universums unmittelbar nach dem Urknall bezeichnen. Dabei ist  $T_{\max}$  die maximale Temperatur, die im All jemals herrschen kann und  $R_{\max}$  der Ereignishorizont, d.h. der maximal mögliche Radius des Alls, der niemals übertroffen werden kann. Betrachten wir nun den Zustand des Universums kurz vor dem nächsten Urknall, so hat die Temperatur ihren niedrigsten Wert  $T = T_{\min}$  angenommen, und der Radius  $R = R_{\max}$  hat ebenfalls seinen größten Wert erreicht, nämlich den Ereignishorizont der Singularität. Sehen wir vom Urknall ab, so dehnt sich das Universum also keineswegs aus, sondern hat stets dieselbe Größe, wobei der Ereignishorizont optisch nicht sichtbar ist. Legen wir ein Flußintegral um das Universum, so würde nichts hinein-, aber auch nichts herausfließen. Die scheinbare Expansion des Alls ist ein relativistischer Effekt, weil uns das Licht innerhalb des Ereignishorizonts zu unterschiedlichen Zeiten erreicht. Jeder Materiebaustein ist gleich alt, wir sehen ihn nur zu unterschiedlichen Zeiten, je nachdem, wo wir uns befinden. Das muß auch so sein, denn die Lichtgeschwindigkeit ist und bleibt konstant. Aufgrund der Einsteinschen Masse-Energie-Äquivalenz ist sie gegeben durch  $c = \sqrt{E/m}$ . Messen wir die Lichtgeschwindigkeit im sichtbaren Universum, so berechnet sie sich gemäß

$$c = \frac{R_{\max}}{t_{\max}},$$

wobei  $t_{\max}$  das Alter des Universums ist. Würden wir sie im bewegten System der Singularität bestimmen, erhielten wir sie rechnerisch aus der Relation

$$c = \frac{ds}{d\tau},$$

wobei  $ds$  das differentielle relativistische Wegelement und  $d\tau$  die Eigenzeit ist.

## Physikaufgabe 46

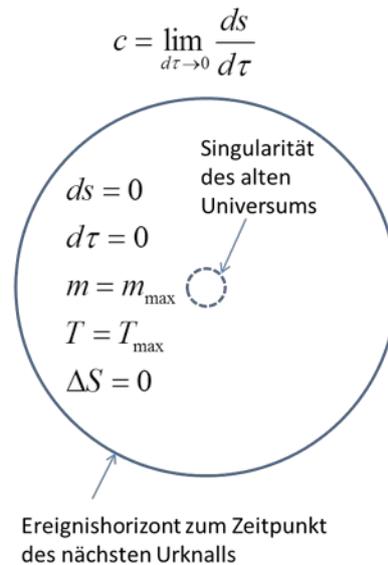


Abbildung 2. Zustand zwischen zwei Universen

Könnten wir bis ans Ende des Alls schauen, so hätte uns das Licht zum Zeitpunkt seiner Entstehung bereits erreicht und es würde wegen  $v = c$  gelten:  $d\tau = 0$  bzw.  $\tau = \text{const}$ , d.h. die Zeit würde stehenbleiben. Wenn dieser Fall eintritt, endet auch die Kausalität, denn Kausalität läßt sich ohne zeitliche Veränderung nicht erklären. Wir würden in beiden Systemen die gleiche Zeit  $t = \tau$  messen und befänden uns daher im selben System. Das Prinzip der Relativität wäre aufgehoben. Doch das kann erst eintreten, wenn alle Materie in der Singularität verschwunden und in dunkle Materie umgewandelt worden ist. Dann wird es dunkel im All. Die Entropiedifferenz am Ende aller Zeiten ist gegeben durch

$$\Delta S = \frac{3}{2} Nk \ln \frac{T_{\min}}{T_{\max}} < 0,$$

während sie zu Beginn der universellen Zeitrechnung innerhalb der Singularität<sup>6</sup> noch bei

$$\Delta S = \frac{3}{2} Nk \ln \frac{R_{\max}^2}{R_{\min}^2} > 0$$

lag. Der Radius  $R_{\min}$  entspricht dem differentiellen relativistischen Wegelement  $ds$ . Dieses kann ebenso wie die Eigenzeit nicht exakt null werden, weil man durch Null nicht dividieren kann. Wäre die Eigenzeit wirklich konstant, dann würde die Lichtgeschwindigkeit den Wert Unendlich annehmen. Setzen wir für das Wegelement<sup>7</sup> und die differentielle Eigenzeit endliche Werte ein, so erhalten wir mit

$$\Delta s \equiv \Delta x \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad \text{und} \quad \Delta \tau = \Delta t \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

<sup>6</sup> Diese Formel gilt wohlgerneht für ein ideales Gas und nicht für ein reales Schwarzes Loch

<sup>7</sup> Wir nehmen es ohne Beschränkung der Allgemeinheit in x-Richtung an

## Physikaufgabe 46

für die Lichtgeschwindigkeit den Ausdruck

$$c = \frac{\Delta s}{\Delta \tau} = \frac{\Delta x}{\Delta t},$$

wobei sich die Wurzelausdrücke wegheben. Nun ist es quantenmechanisch allerdings nicht möglich, daß eine mikroskopische Singularität ohne Heisenbergsche Ortsunschärfe vorstellbar wäre. Da Ort und Zeit in der Einsteinschen Formulierung einen Vierervektor bilden, gilt dies genauso für die Zeit. Hierbei dürfen wir nicht dem Fehler unterliegen, daß die relativistischen Orts- und Zeitdifferenzen nicht null werden könnten. Das können sie sehr wohl, da die Allgemeine Relativitätstheorie keine quantenmechanischen Aussagen macht, welche das verbieten würden. In unserem Fall haben wir die infinitesimalen relativistischen Größen durch quantenmechanische Variablen ersetzt, für die die Heisenbergsche Unschärferelation gilt:

$$\Delta x \geq \frac{\hbar}{2\Delta p} \quad \text{und} \quad \Delta t \geq \frac{\hbar}{2\Delta E}.$$

Die Werte Null können also in der Singularität weder für Ort noch Zeit je angenommen werden, weil eine Singularität ein mikroskopisches Objekt ist, selbst wenn die Masse des gesamten Weltalls darin enthalten ist. Wir können daher die Lichtgeschwindigkeit nur als konstanten Grenzwert

$$c = \lim_{d\tau \rightarrow 0} \frac{ds}{d\tau}$$

definieren.

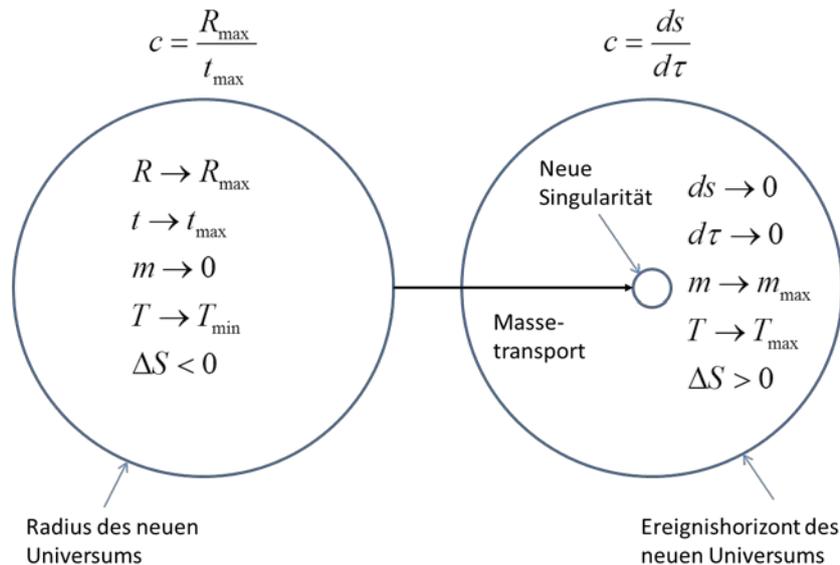


Abbildung 3. Zustand des künftigen Universums

Demnach muß strikte Proportionalität zwischen Orts- und Zeitunschärfe herrschen. Betrachten wir die Verhältnisse im Falle des Urknalls in Abb. 2. Dieser Fall stellt den Zustand zwischen zwei Universen dar: einem alten, das in der Singularität verschwunden, und einem neu-

## Physikaufgabe 46

---

en, das soeben aus der Singularität hervorgegangen ist. Das ist der einzige Zustand, in dem altes und neues Universum nicht überlappen. Die Masse ist gleichverteilt, die Temperatur maximal und die Entropieänderung null. Die Vorstellung, daß die Materie erst nach und nach aus der Singularität hervorkommt, ist sicher unzutreffend, weil Materie aufgrund der Gravitation entweder nur in einer Singularität verschwinden kann oder schlagartig freigesetzt wird, wenn der Gravitationsdruck im Innern zu groß wird. Mit diesem Ereignis beginnt die Zeit zu laufen und die Kausalität setzt ein – ohne Ursache, weil der Urknall zu keiner bestimmten Zeit erfolgt. Es gab ja zum Zeitpunkt des Urknalls noch keine Zeit bis auf Fluktuationen der Singularität. Ein scheinbar paradoxer Zustand, der keine Erinnerung an den vorherigen ermöglicht. Dieser Zustand gestattet auch kein willentliches Eingreifen, weil dies eine Form der Kausalität wäre, die wiederum die Existenz einer Zeit voraussetzen würde. Damit ist gezeigt, daß es im Zeitpunkt des Urknalls keine Kausalität gegeben haben kann, da die Fluktuationen in diesem Zeitpunkt zeitlich eingefroren scheinen. Möglicherweise kann der relativistische Effekt der geringen Zeitunschärfe aber durch die dann sehr hohe Frequenzunschärfe kompensiert werden, womit die Potentialbarriere aufgrund der extremen Temperaturen in der Singularität nur noch durch Tunneln zu überwinden wäre,

qed

Anmerkung: Abb. 3 zeigt der Vollständigkeit halber die Verhältnisse im neuen Universum, die spiegelverkehrt zum alten sind. Das nach und nach größer werdende Schwarze Loch ist wahrscheinlich kurz nach dem Urknall entstanden, Energie und Masse blieben dabei erhalten. Wie sich die Ereignisse in dem neuen Universum entwickeln werden oder ob alles wie im alten ablaufen wird, bleibt ein Geheimnis, welches die Wissenschaft möglicherweise niemals lüften wird, weil es sich wie gesagt um zwei völlig verschiedene Welten handelt, die keine Information unter sich austauschen können.