



Astronomie

Imaginäre Zeit

-

Ein Urknall ohne Singularität?

Johann Baum

Greselius Gymnasium Bramsche

Jahrgang 12 – 2024/2025

Florian Riemer

Abgabetermin: 07.03.2025

Abgabeort: Sekretariat GGB

49565 Bramsche

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	2
2	Die Zeit in der Physik.....	3
2.1	Zeit in der klassischen Physik.....	3
2.2	Zeit in Albert Einsteins spezieller Relativitätstheorie.....	4
2.3	Der Minkowski-Raum.....	5
3	Grundlagen für das „no boundary proposal“.....	8
3.1	Komplexe Zahlen.....	8
3.2	Die Wick-Rotation.....	9
4	Die Lösung des Singularitäts-Problems.....	9
4.1	Das Standardmodell des Urknalls.....	9
4.2	Das „No boundary proposal“.....	10
4.2.1	Ein Universum ohne Rand.....	10
4.2.2	Welle-Teilchen Dualismus und Unschärferelation.....	12
4.2.3	Die Wellenfunktion des Universums.....	13
4.3	Was bedeutet das für unser Universum?.....	14
5	Fazit.....	14
6	Anhang.....	16
6.1	Literaturverzeichnis.....	16
6.1.1.1	Digitale Literatur.....	16
6.1.1.2	Digitale Literatur (Abbildungen).....	17
6.1.2	Analoge Literatur.....	18
6.2	Erklärungen.....	18
6.2.1	Erklärung zur eigenständigen Anfertigung.....	18
6.2.2	Erklärung zur Veröffentlichung.....	18

1 Einleitung

Was ist eigentlich Zeit? Im Alltag sagt uns die Zeit, wann wir morgens aufstehen müssen, wann es mittags Essen gibt und wann es Zeit ist, abends schlafen zu gehen. Zeit scheint für uns wie ein fortwährender Fluss, ein Fluss, der unveränderlich, unaufhaltsam und unendlich voranschreitet und das, seit wir denken können. Doch könnte auch so etwas Absolutes wie die Zeit einen Anfang gehabt haben? Wie dieser ausgesehen haben könnte, ist eine der faszinierendsten Fragen der Physik und einer möglichen Antwort möchte ich mich in dieser Facharbeit widmen: Der imaginären Zeit. Anders als es der Name vermuten lässt, ist die imaginäre Zeit eine mathematisch präzise und ebenso physikalisch sinnvolle Lösung für das Singularitätsproblem des Urknalls. Wie genau die Imaginäre Zeit funktioniert und warum sie eines der wichtigsten Konzepte der modernen Kosmologie ist, wird in dieser Arbeit erläutert.

Aufgrund der begrenzten Seitenanzahl und der Verständlichkeit werde ich mich auf die wesentlichen Aspekte und Konzepte beschränken und ggf. manche mathematischen Herleitungen oder Abstraktionen gekürzt oder vereinfacht darstellen, um im Umfang der Vorgaben zu schreiben und den Fokus des wesentlichen Konzeptes nicht zu verlieren: Der imaginären Zeit. Um eine nachvollziehbare und anschauliche Erklärung bieten zu können, werde ich zunächst die Zeit in der klassischen Physik (Kap. 2.1) darstellen und anschließend die Zeit in der speziellen Relativitätstheorie (Kap. 2.2), um ein allgemeines Verständnis der Zeit in der Physik zu schaffen. Ebenso essentiell wird die darauffolgende Einführung in das invariante Intervall und die Minkowski-Metrik sein (Kap. 2.3), die dann das Fundament der Lösung des Singularitätsproblems sein werden. Des Weiteren sind gewisse mathematische Grundlagen unverzichtbar, daher werde ich die Mathematik komplexer Zahlen und ihre Rolle in der Physik präsentieren (Kap. 3.1). Danach leite ich über von der Minkowski-Metrik zur euklidischen Metrik und stelle mit der Wick-Rotation das mathematische Kernkonzept der imaginären Zeit vor (Kap. 3.2). Als Vorbereitung für Hawkings Vorstellungen und Ideen zu dem Thema greife ich

kurz das allgemeine Standardmodell des Urknalls auf und gehe auch explizit auf die Probleme mit der Singularität des Urknalls ein (Kap. 4.1). Ich werde Stephen Hawking und James Hartle „No boundary proposal“ präsentieren und einerseits erklären, was hinter der Theorie steckt (Kap. 4.2) und andererseits welche Konsequenzen das „No boundary proposal“ unserem Universum bringen würde (Kap. 4.3). Die Arbeit schließt mit einem Fazit ab (Kap. 5).

2 Die Zeit in der Physik

Mit der Erläuterung des Wandels der Vorstellung der Zeit und der detaillierten Erklärung der Zeit in Einsteins spezieller Relativitätstheorie möchte ich das erforderliche Grundwissen für die imaginäre Zeit vermitteln.

2.1 Zeit in der klassischen Physik

Isaac Newton, Verwaltungsbeamter, Philosoph, Alchemist, Astronom, Mathematiker und einer, wenn nicht sogar der wichtigste Physiker der Geschichte, sah die Zeit als etwas Starres an. Nach ihm könne man jedem Ereignis eine Raum- und eine Zeit-Koordinate zuschreiben. Man könne anhand der Zeit-Koordinate bestimmen, wann etwas geschehe und als Konsequenz Ereignisse chronologisch ordnen und in Ursache-Wirkungsbeziehungen unterteilen.¹ In der klassischen Physik war die Zeit also so etwas wie eine linearere, nicht veränderbare Achse. Alles passierte auf dieser Achse, alles konnte in Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft unterteilt werden. Es gab immer ein klares „Davor“ oder „Danach“. Man hielt an diesem Zeitbild bis zum Ende des 19. Jahrhunderts fest, also bis zum Ende der klassischen Physik.²

1 Vgl. Gebeshuber, I.C. Eine fundierte Einführung in die Zeit
https://www2.iap.tuwien.ac.at/~gebeshuber/ille_zeit.pdf

2 Vgl. Spektrum Akademischer Verlag, klassische Physik
<https://www.spektrum.de/lexikon/physik/klassische-physik/8062>

2.2 Zeit in Albert Einsteins spezieller Relativitätstheorie

Dieses fundamentale und absolute Bild der Zeit blieb bestehen, bis Albert Einstein 1905 die spezielle Relativitätstheorie einführte³ und mit ihr das Bild der Zeit für immer veränderte. Die Zeitwahrnehmung war nicht mehr absolut, sondern hing fortan von der relativen Geschwindigkeit des Beobachters ab. Doch was heißt das? Zunächst verabschiedete sich Einstein von der Idee, Raum und Zeit seien getrennte und von einander unabhängige Dimensionen. Die darauf von Hermann Minkowski eingeführte Raumzeit ist ein vierdimensionales Kontinuum, welches die drei Raumdimensionen und zusätzlich noch eine vierte Dimension beschreibt, die Zeit⁴. Hermann Minkowski war ein deutscher Mathematiker und Physiker⁵, auf den und dessen konkrete Ideen zu der Raumzeit ich später noch eingehen werde. Was sagt diese Verbindung von Raum und Zeit nun aber aus? Grundlagen für diese neue Geometrie der Physik sind erstens die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit c ⁶, die besagt, dass die Lichtgeschwindigkeit für alle Beobachter unabhängig von ihrer Bewegung stets denselben Wert hat und zweitens das Relativitätsprinzip. Das Relativitätsprinzip besagt, dass in jedem Inertialsystem (ein System, in dem ein Körper ohne äußeren Kräfteeinfluss in Ruhe bleibt oder sich geradlinig mit konstanter Geschwindigkeit v bewegt) die Gesetze der Physik identisch gelten. Also sind die physikalischen Gesetze nicht abhängig von der gleichförmigen Bewegung des Systems.⁷ Basierend auf dieser neuen Geometrie der Physik folgen unmittelbar tiefgreifende Konsequenzen, wie die zwei zentralen relativistischen Effekte, die sogenannte Längenkontraktion und die Zeitdilatation. Die Längenkontraktion besagt vereinfacht, dass ein bewegtes Objekt aus Sicht eines ruhenden Beobachters in Bewegungsrichtung kürzer erscheint⁸. Da ich mich aber auf die Zeit fokussieren möchte, werde ich auf dieses Phänomen nicht weiter eingehen. Die Zeitdilatation hingegen besagt, dass die Zeit

3 Vgl. Wikipedia, Relativitätstheorie, <https://de.wikipedia.org/wiki/Relativitätstheorie#:~:text=Die%20Relativitätstheorie%20befasst%20sich%20mit,der%201916%20abgeschlossenen%20allgemeinen%20Relativitätstheorie.>

4 Vgl. Sabine Hosenfelder, Special Relativity: This is why you misunderstand it, 0:54-3:00, <https://www.youtube.com/watch?v=ZdrZf4lQTSg&t=810s>

5 Vgl. Wikipedia, Hermann Minkowski https://de.wikipedia.org/wiki/Hermann_Minkowski

6 $c = 299\,792\,458\text{ m/s}$, vgl. Studyflix, Was ist Lichtgeschwindigkeit?, <https://studyflix.de/ingenieurwissenschaften/lichtgeschwindigkeit-2399>

7 Vgl. Spektrum Akademischer Verlag, Relativitätsprinzip, <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/relativitaetsprinzip/12326>

8 Vgl. FWU Institut für Film und Bild, <https://www.leifiphysik.de/relativitaetstheorie/spezielle-relativitaetstheorie/grundwissen/laengenkontraktion>

in einem bewegten System aus Sicht eines ruhenden Beobachters langsamer vergeht und somit gedehnt wird. Würde man also z.B. zwei perfekt gleich gestellte Uhren nehmen und die eine auf der Erde lassen, während die andere in einer Rakete mit einer Geschwindigkeit v nahe der Lichtgeschwindigkeit c um die Erde kreist, so könnte man, nachdem die Rakete zurück auf der Erde ist, feststellen, dass die Uhr, die sich in der Rakete bewegt hat eine andere Zeit zeigt, als die Uhr, die nur auf der Erde war. Die Zeit in der bewegten Rakete ist messbar langsamer vergangen.⁹ Somit definierte Einstein unsere Vorstellung der Zeit gänzlich neu, aus dem starren Zeitstrahl Newtons ist eine vom Raum abhängige Zeit geworden und es folgt eine untrennbare Symbiose aus Raum und Zeit.

2.3 Der Minkowski-Raum

Wie schon erwähnt war Einstein nicht der Ursprung der Idee der Raumzeit, sondern Minkowski. Jener erkannte nämlich, dass sich die neue spezielle Relativitätstheorie nicht in einem euklidischen Raum formulieren lässt. Ein euklidischer Raum ist hierbei ein Raum, wie er aus der klassischen Mathematik bekannt ist, also ein Raum, in dem z.B. der kürzeste Weg zwischen zwei Punkten eine gerade Linie ist und in dem der Satz des Pythagoras gilt.¹⁰ Minkowski vermutete also eine andere Art von Raum in kosmischer Größenordnung, sodass

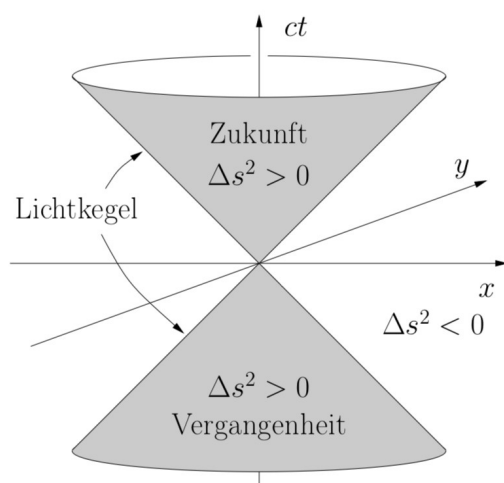


Abbildung 1: Minkowski-Raum mit Lichtkegel

sich die spezielle Relativitätstheorie dort formulieren ließe. Das Produkt: Der vierdimensionale Minkowski-Raum, eine Vereinigung von Raum und Zeit.

⁹ Vgl. Uni Wien, <https://homepage.univie.ac.at/franz.embacher/SRT/Zeitdilatation.html>

¹⁰ Vgl. Wikipedia, https://de.wikipedia.org/wiki/Euklidischer_Raum

Die grafische Darstellung des Minkowski-Raumes (Abb.1) zeigt in diesem Fall eine vereinfachte dreidimensionale Version (x, y, ct). Auf der Abbildung gibt es drei Achsen, x, y, ct . Warum „ ct “ und nicht „ t “ als Achse gewählt wurde werde ich später erklären. Der zentrale Punkt der Metrik, an dem sich alle Achsen treffen, wird „Weltpunkt“ genannt. Er bezeichnet den Ausgangspunkt in der Raumzeit. Somit ist alles überhalb des Punktes die Zukunft und alles unterhalb des Punktes die Vergangenheit und der Weltpunkt das „Jetzt“. Wenn man sich im Raum nicht bewegt, dann würden sich die x - und y -Koordinaten nicht ändern und man würde sich senkrecht in dieser Minkowski-Metrik nach oben bewegen, da sich nur die ct -Koordinate ändert, man bewege sich also nur durch die Zeit (multipliziert mit der Lichtgeschwindigkeit). Die „Weltlinie“, die diese Bewegung durch die Raumzeit darstellt, würde also senkrecht nach oben verlaufen. Wenn man sich aber durch den Raum bewegt, dann würde diese Weltlinie nicht mehr senkrecht verlaufen, sondern leicht geneigt, je nachdem in welche Raum-Richtung man sich bewege (bewegt man sich z.B. in x -Richtung, so neigt sich die Weltlinie in x -Richtung). Der Lichtkegel in der Abbildung, bzw. die zwei Lichtkegel sind die grau eingefärbten Kegel. Für den Minkowski-Raum wurde definiert, dass sich das Licht exakt im 45° Winkel zu den Achsen bewegt, man könnte also sagen, dass sich das Licht nur auf diesem Kegel bewegen kann. Somit könnte man ein ruhendes System mit einer senkrechten Weltlinie und ein bewegtes System mit einer Weltlinie mit einem beliebigen Winkel α haben und für beide ist der Wert der Lichtgeschwindigkeit identisch. Ebenso kann nach der speziellen Relativitätstheorie keine Weltlinie außerhalb des Kegels sein: Aber warum? Je größer der Winkel von der Weltlinie zur ct -Achse, desto weniger Zeitbewegung bei einer Raumbewegung, also weniger Zeit für eine Strecke bzw. eine höhere Geschwindigkeit. Wenn das Licht jetzt also einen 45° Winkel hat, bräuchte man für eine Weltlinie mit einem größeren Winkel eine Überlichtgeschwindigkeit, was nach Einsteins spezieller Relativitätstheorie nicht möglich ist. Wenn ein Punkt also im Lichtkegel ist, dann ist er vom Weltpunkt aus kausal erreichbar, man kann das Ereignis mit einer Geschwindigkeit kleiner der Lichtgeschwindigkeit c erreichen und das Ereignis kann kausal Einfluss auf den Weltpunkt nehmen.¹¹ Mathematisch kann man auch bestimmen, ob zwei Punkte kausal erreichbar sind

11 Vgl. Rödel, V., Der Minkowski-Raum (Kurzfassung),
https://www.neue-physik.de/551.0_Minkowski.php

und zwar mit dem so genannten invarianten Intervall und den Lorentz-Transformationen. Um wieder die begrenzte Seitenzahl und das Verständnis im Blick zu behalten, werde ich auf die Herleitungen verzichten und die einfachsten Formen der Gleichungen beibehalten. Mit den Lorentz-Umformungen lässt sich die Längenkontraktion und Zeitdilatation in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit bestimmen. Es gilt: $x' = \gamma(x - vt)$ und $t' = \gamma(t - \frac{vx}{c^2})$, γ ist hierbei

der Lorentzfaktor, welcher mit $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ berechnet werden kann. x' ist die

kontrahierte Länge und t' ist die dilatierte Zeit. Setzt man in die Gleichungen Werte aus dem Alltag ein, so wird man feststellen, dass sich x' von x nicht unterscheidet und t' genauso wenig von t , weil die Veränderungen erst bei extrem hohen Geschwindigkeiten nahe der Lichtgeschwindigkeit c messbare Werte erhalten.¹² Um jetzt bestimmen zu können, ob zwei Ereignisse kausal erreichbar sind, wird das invariante Intervall benötigt. Invariant meint, dass es in allen Inertialsystemen gleich ist. Mit $\Delta s^2 = -c^2 \Delta t^2 + \Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2$ lässt sich das invariante Intervall, also der Abstand zweier Punkte in der Raumzeit, berechnen. Hierbei steht Δs für das invariante Intervall. Jetzt lässt sich anhand der Einheiten auch erkennen, warum eine ct -Achse und keine t -Achse gewählt wurde, da $\frac{m}{s}$ mit s multipliziert m ergibt und somit alle Werte die gleiche Einheit haben. Mit den Werten für Δs lässt sich nun sagen, ob eine kausale Erreichbarkeit von zwei Punkten vorherrscht. Bei $\Delta s > 0$ spricht man von einem zeitartigen Abstand und die beiden Punkte können kausal verbunden sein. Also könnte sich ein Objekt mit $v < c$ zwischen den Ereignissen bewegen. Wenn aber $\Delta s > 0$ gilt, dann ist der Abstand raumartig und es besteht keine kausale Verbindung. Ein Beispiel wären z.B. zwei Blitze, die zur selben Zeit an verschiedenen Orten einschlagen. Bei $\Delta s = 0$ ist der Abstand lichtartig, die Ereignisse sind durch eine Lichtstrahlbahn verbunden und ein Objekt mit Masse kann sich so schnell nicht bewegen, nur masselose Teilchen (z.B. Photonen) oder elektromagnetische Strahlung.¹³

12 Vgl. StudySmarter GmbH, Lorentz-Transformation, <https://www.studysmarter.de/ausbildung/ausbildung-in-chemie/physiklaborant-ausbildung/lorentz-transformation/>

13 Vgl. Rödel, V., Der Minkowski-Raum (Kurzfassung), https://www.neue-physik.de/551.0_Minkowski.php

3 Grundlagen für das „no boundary proposal“

3.1 Komplexe Zahlen

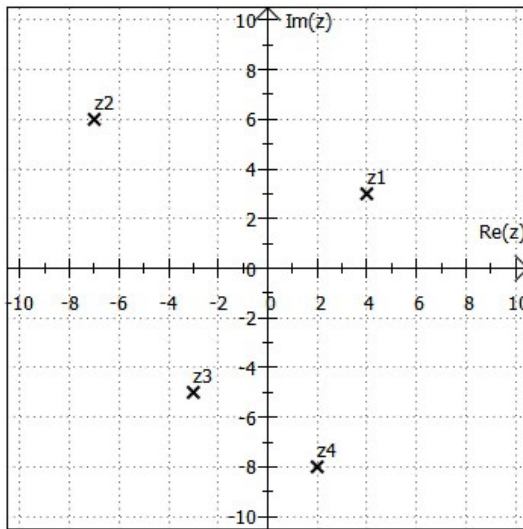


Abbildung 2: Gaußsche Zahlenebene

Die mathematische Basis der imaginären Zeit sind die komplexen Zahlen. Die Gleichung $x^2 = -1$ hat keine reelle Lösung. $\sqrt{1} = 1$, da $1^2 = 1$, quadriert man aber -1 , so stellt man fest, dass $(-1)^2 = 1$ ist. Man findet also keine reelle Lösung und endet bei $x = \sqrt{-1}$. Leonhard Euler führte die imaginäre Einheit i als Antwort auf ein scheinbar unlösbares Problem ein (die Ursprünge der komplexen Zahlen

liegen vor den Lebzeiten Eulers, jedoch

kam die Formulierung i für die imaginäre Einheit von Euler). Euler definierte also $i^2 = -1$ und folgeweise $i = \sqrt{-1}$. Hat man nun aber eine Kombination aus der imaginären Einheit i und einer reellen Zahl, so erhält man eine komplexe Zahl z . Wenn ich z.B. $x = 3\sqrt{-1} + 4$ habe, dann ist mein Ergebnis eine komplexe Zahl mit $z = 4 + 3i$. Im Allgemeinen gilt $z = x + yi$ oder $z = a + bi$ (Mathematisch sind beide Schreibweisen gleichwertig), wobei x bzw. a die reelle Komponente der komplexen Zahl ist, y bzw. b die imaginäre Komponente und i die imaginäre Einheit.¹⁴ Darstellen lassen sich komplexe Zahlen als geometrische Interpretation z.B. als Vektoren in der Gauß'schen Zahlenebene, wobei die y -Achse die imaginären Zahlen ($Im(z)$) und die x -Achse die reellen Zahlen ($Re(z)$) darstellt (Abb. 2).¹⁵

¹⁴ Vgl. TU. Dortmund, Was sind komplexe Zahlen und wer hat sie erfunden?, https://wwwold.mathematik.tu-dortmund.de/sites/funktionentheorie-i-wise-2023-24/download/Komplexe_Zahlen_Historie.pdf

¹⁵ Vgl. Mathe by Daniel Jung, Komplexe Zahlen | Mathe by Daniel Jung, <https://www.youtube.com/watch?v=XHFqRwCQzUs>

3.2 Die Wick-Rotation

Durch die sogenannte Wick-Rotation als mathematisches Werkzeug erkannte man, dass auch der Minkowski Raum mit $\Delta s^2 = -c^2 \Delta t^2 + \Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2$ zu einer einfacheren, euklidischen Raumzeit werden kann. Setzt man für t nämlich nun komplexe Zahlen ein, erhält man einen vierdimensionalen euklidischen Raum, in dem die Zeit-Dimension eine gleichwertige Struktur hat wie die drei Raum-Dimensionen. Setzt man it (bzw. ω da $\omega = it$) für t ein, so wird das Vorzeichen des $-c^2 t^2$ -Terms in der Gleichung positiv, da $i^2 = -1$ gilt. Im Folgenden erhält man also $\Delta s^2 = c^2 \Delta t^2 + \Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2$, was einer Metrik eines vierdimensionalen Raum in der klassischen Geometrie entspricht. Man hat also einen vierdimensionalen euklidischen Raum, bei dem Raum und Zeit gleichwertig sind und klassische geometrische Rechnungen möglich sind, bei einer imaginären Zeit.¹⁶ (Die imaginäre Zeit wird gleichfalls auch als τ statt ω bezeichnet.)

4 Die Lösung des Singularitäts-Problems

4.1 Das Standardmodell des Urknalls

Vor etwa 13,8 Milliarden Jahren setzte eine rapide Expansion des Universums ein, die heute als Urknall bekannt ist. Das Universum hatte zu diesem Zeitpunkt eine extrem hohe Dichte und eine extrem hohe Temperatur, eine so hohe Temperatur, dass sich keine Atome bilden konnten. Das Universum war auf einen winzigen Punkt konzentriert, bevor es sich schlagartig ausdehnte – für einen winzigen Moment sogar schneller als das Licht. Die Expansion verlangsamte sich nach einer Sekunde jedoch wieder und bereits nach wenigen Minuten war das Universum abgekühlt genug für die Bildung von subatomaren Teilchen.¹⁷ Publiziert wurde diese Theorie zuerst von dem belgischen Priester und Wissenschaftler Georges Lemaître. Lemaître sprach dabei von einem Uratom, in welchem die gesamte Materie des Universums zusammengepresst war. So ein Nullpunkt der Zeit führte jedoch dazu, dass Einsteins Gleichungen nach der allgemeinen Relativitätstheorie ihre Aussagekraft verlieren würden, da die Raumzeit bei $t=0$ unendlich gekrümmt werden würde. Aufgrund der

¹⁶ Vgl. Wikipedia, Wick-Rotation, <https://de.wikipedia.org/wiki/Wick-Rotation>

¹⁷ Vgl. Gianopoulos, A, Big Bang, <https://science.nasa.gov/mission/hubble/science/science-behind-the-discoveries/hubble-big-bang/>

beschränkten Seitenzahl und der Komplexität werde ich jedoch nicht konkreter auf Einsteins allgemeine Relativitätstheorie eingehen und warum mathematisch gesehen für einen Zeitpunkt Null mit Lemaître's Uratom eine unendliche Raumkrümmung folgen würde.¹⁸ Für das folgende Kapitel ist es wichtig zu verinnerlichen, dass eine solche kausale Singularität die Grenzen von Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie aufzeigt und damit ein Kernproblem der modernen Kosmologie darstellt.

4.2 Das „No boundary proposal“

Mit dem No boundary proposal entwickelten James Hartle und Stephen Hawking eine Theorie zum Anfang des Universums, die sich von allen anderen Theorien unterscheiden sollte. Sie schlugen vor: Ein Universum ohne Rand.

4.2.1 Ein Universum ohne Rand

Wenn ein Universum mit einem klar definierten Anfang solche mathematischen Probleme macht, wie wäre es dann mit einem Universum ohne klaren Anfang, ohne Singularität, ohne Rand? James Hartles und Stephen Hawkings „No boundary proposal“ verkörpert diese These. Hawking und Hartle fanden eine elegante Lösung, die das Singularitäts-Problem umging. 1981 stellte Hawking erstmals die Idee vor, dass Raum und Zeit zusammen eine begrenzte Oberfläche bilden würden und dabei keinen klaren Rand oder eine Grenze hätten. Anders als in anderen Vorstellungen des Urknalls hätte man keinen Punkt der Singularität mit unendlich hoher Dichte und Raumkrümmung, Raum und Zeit würden in Richtung Urknall ihre heutigen klaren Strukturen verlieren und man könnte keinen klaren Anfang der Zeit feststellen. Stattdessen hätte man einen Teil mit einer imaginären Raumzeit.¹⁹ Die imaginäre Raumzeit beschreibt Hawking als Kugel, die zwar an den Polen eine Größe Null, jedoch keine Singularität zur Folge hätte. Man hätte eine Art abgerundete Raumzeit.²⁰ Der Hartle-Hawking State zeigt ein sich

18 Vgl. Hertog, T., Der Ursprung der Zeit, -Mein Weg mit Stephen Hawking zu einer neuen Theorie des Universums, S. 99-101

19 Vgl. Phil Halper (aka Skydivephil), Before the Big Bang 5: The No Boundary Proposal, 03:30-05:00, https://www.youtube.com/watch?v=Ry_pILPr7B8&list=PLI15VVOLXZxgHMLFh7vu1TGQUGmev6ksC&index=2

20 Vgl. Hawking, S., Das Universum in einer Nussschale, S. 69

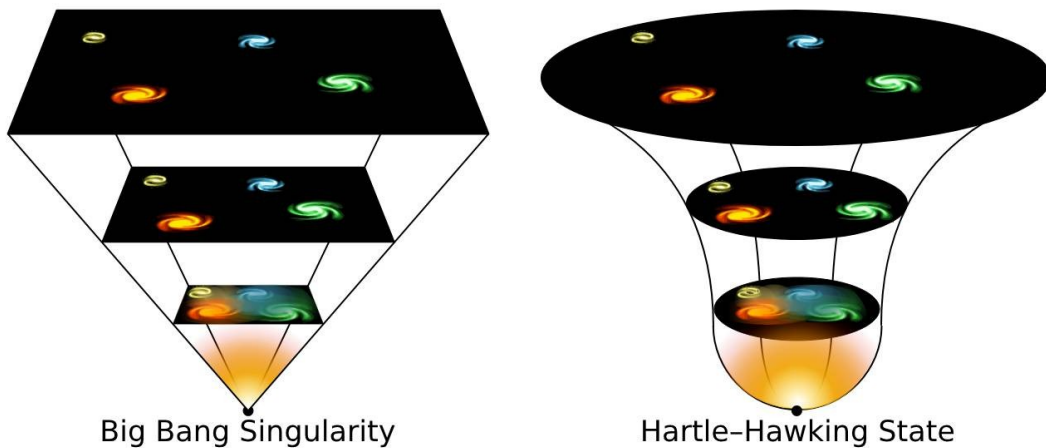


Abbildung 3: Urknall und Hartle-Hawking State Diagramm

ausbreitendes Universum, welches jedoch anfangs einen vierdimensionalen, euklidischen Raum mit der imaginären Zeit bildet (Abb. 3). Am Anfang unseres Universums verhält sich die Zeit also wie eine Raum-Dimension, später jedoch wird die Zeit in ihrer Struktur anders als die Raum-Dimensionen und lässt sich von ihnen unterscheiden. Man könnte also am Anfang noch die Zeit mit einer anderen Raum-Dimension tauschen und hätte aufgrund ihrer gleichen Struktur das gleiche Ergebnis. Später aber, bei bereits ausgebreitetem Raum, unterscheiden sich Raum und Zeit in ihrer Struktur so, dass man sie nicht einfach so tauschen könnte. Hartle und Hawking schlagen also einen Beginn des Universums ohne Singularität vor und dafür eine Anfangsphase des Universums, in der sich die Zeit nicht von den anderen Raum-Dimensionen unterscheiden ließe. Um das zu erreichen müsste man wie bereits in Kap. 3.2 erwähnt einen komplexen Zahlenwert für die Zeit t in die Formel $\Delta s^2 = -c^2 \Delta t^2 + \Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2$ einsetzen, um $\Delta s^2 = c^2 \Delta t^2 + \Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2$ zu erhalten. Wenn man nun also mit einer imaginären Zeit τ rechnet, so ließe sich die Zeit-Dimension nicht von den Raum-Dimensionen unterscheiden und man hätte einen vierdimensionalen euklidischen Raum. Die Zeit hatte also keine lineare Struktur wie heute, sondern eine räumliche, wie z.B. bei der Oberfläche einer Kugel. Somit hätte das Universum keinen klaren Rand, sondern eine Art glatte, abgerundete Übergangsphase als Anfang.²¹ Um den Anfang des Universums konkret zu verstehen, vereinten Hartle

²¹ Vgl. Phil Halper (aka Skydivephil), Before the Big Bang 5: The No Boundary Proposal, 10:30-11:30, https://www.youtube.com/watch?v=Ry_pILPr7B8&list=PLI15VVOLXZxgHMLFh7vu1TGQUGmev6ksC&index=2

und Hawking die allgemeine Relativitätstheorie mit der Quantenmechanik.²² Sie beschrieben das gesamte Universum als Quantenobjekt und führten die Wellenfunktion des Universums ein, doch was das genau bedeutet, erläutere ich in einem kleinen Exkurs in die Quantenmechanik:

4.2.2 Welle-Teilchen Dualismus und Unschärferelation

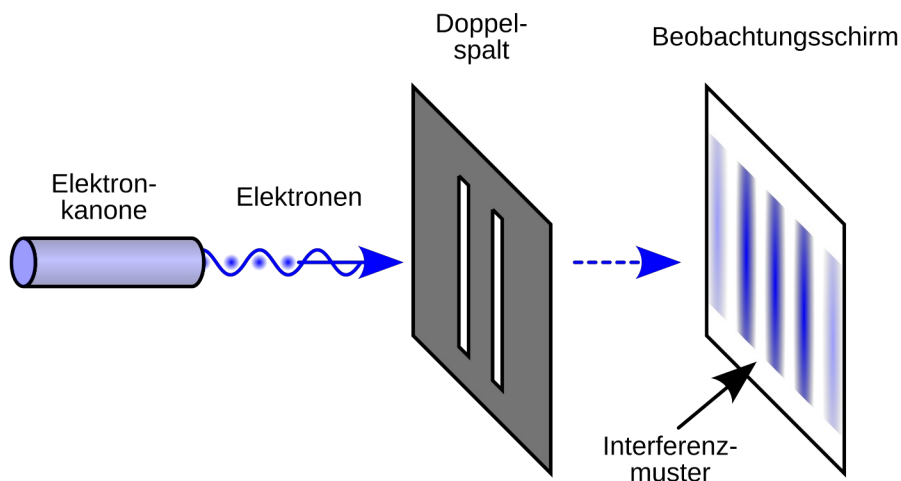


Abbildung 4: Doppelspaltexperiment

Auch in diesem Unterkapitel werde ich mich kurz gefasst auf das Wesentlichste konzentrieren, damit die Darstellung des Universums als Quantenobjekt klar wird. Das sogenannte „Doppel-Spalt“-Experiment (Abb. 4) soll kurz den Welle-Teilchen-Dualismus erklären. In dem Experiment werden Elektronen durch eine Wand mit zwei kleine Spalten geschossen, währenddessen ist hinter der Wand ein Beobachtungsschirm, welcher erkennt, wo die Elektronen aufkommen. Man würde erwarten, dass man auf dem Beobachtungsschirm genau zwei Balken sieht (jeweils hinter einem Spalt), da ja durch diese zwei Spalten die Elektronen durchgeflogen sind. Jedoch erkennt man nach Durchführung des Experiments, dass sich auf dem Beobachtungsschirm ein so genanntes „Interferenzmuster“ gebildet hat. Ein solches Muster kann nur durch eine Beugung einer Wellenausbreitung entstehen - kurzgesagt bedeutet das, dass die Elektronen als eine Welle agiert haben müssen, damit so ein Muster detektiert werden kann. Man

²² Vgl. Phil Halper (aka Skydivephil), Before the Big Bang 5: The No Boundary Proposal, 03:30-03:37, https://www.youtube.com/watch?v=Ry_pILPr7B8&list=PLI15VVOLXZxgHMLFh7vu1TGQUGmev6ksC&index=2

erkannte also folgeweise, dass Elektronen sowohl als Teilchen, als auch als Wellen agieren können. Ursprünglich wurde dieses Experiment mit Licht gemacht, doch nach weiteren Experimenten entdeckte man, dass auch Elementarteilchen, Atome und sogar Moleküle Welleneigenschaften und eine Wellenfunktion haben. Es war also der sogenannte Welle-Teilchen-Dualismus geboren. Jedes Teilchen, jedes Molekül, alles hat eine Wellenfunktion und Welleneigenschaften.²³ Je nach Art der Messung offenbart ein Objekt also Welleneigenschaften oder Teilcheneigenschaften. Außerdem kann man nach der Heisenbergschen Unschärferelation bei einem Teilchen nur eine Wahrscheinlichkeit des Standortes berechnen, nie einen genauen Standort. Man könnte z.B. berechnen, dass das Elektron zu 80% an Stelle x ist und zu 20% an Stelle y , man könnte aber immer nur von Wahrscheinlichkeiten reden.²⁴

4.2.3 Die Wellenfunktion des Universums

Hartle und Hawking beschrieben das Universum auf großer Ebene nicht nur klassisch, sondern auch quantenmechanisch. Sie entwickelten eine Wellenfunktion Ψ , welche beschrieb, wie Wahrscheinlich bestimmte Anfangszustände waren. Ψ beschreibt also nicht den Aufenthaltsort von einem Teilchen, sondern den gesamten Aufbau des Universums und die Geometrie der Raumzeit. Auf die Mathematik hinter der Funktion Ψ werde ich ebenfalls im Sinne der allgemeinen Verständlichkeit nicht weiter eingehen. Wichtig zu verstehen ist aber, dass eine Beschreibung des Universums auf Quantenebene nicht wie in der normalen Kosmologie zwangsweise auf eine Singularität hinausläuft. Durch die quantenmechanische Beschreibung entstehen viele verschiedene Wege, die das Universum genommen haben könnte, ohne, dass es einen klaren Anfangszustand gibt. Durch die No boundary Bedingung ergab sich, dass nur Universen ohne Singularität eine stabile Wahrscheinlichkeitsverteilung in ihrer Wellenfunktion Ψ haben. Das bedeutet, dass es höchstwahrscheinlich nur ein Universum mit Hartle-Hawking State gegeben haben kann, welches sich dann in einem glatten quantenmechanischen Übergang zu unserer jetzigen Geometrie entwickelte.

23 Vgl. Wikipedia, Doppelspaltexperiment, <https://de.wikipedia.org/wiki/Doppelspaltexperiment>

24 Vgl. Wikipedia, Heisenbergsche Unschärferelation, https://de.wikipedia.org/wiki/Heisenbergsche_Unschärferelation

Daraus folgt die zentrale Bedeutung der imaginären Zeit. Die imaginäre Zeit ist eine Möglichkeit, den Punkt der unendlichen Dichte und Raumkrümmung zu umgehen, da sie eine euklidische Fläche bildet, aus der sich das Universum sanft, quantenmechanisch entwickeln und ausbreiten kann. Die Singularität wurde also durch die imaginäre Raumzeit umgangen.²⁵

4.3 Was bedeutet das für unser Universum?

Mit dem No boundary proposal wurde ein neues Fundament für die Multiversum-Theorie²⁶ gelegt. Durch die euklidische Metrik und die Zeit als vierte Raumdimension am Anfang des Universums könnten unendlich viele Universen aus Quantenergebnissen entstanden sein. Man müsste also nicht wie in anderen Multiversum-Theorien von unterschiedlichen in sich abgeschlossenen Taschen-Universen innerhalb eines Raum-Zeit-Kontinuums ausgehen, sondern könnte von voneinander mehr oder weniger unabhängigen Universen ausgehen, die durch ihre verschiedenen „Standorte“ in der imaginären Zeit von einander getrennt sind.²⁷ Außerdem könnte mit dem No boundary proposal ein Universum ohne klares Ende existieren. Stattdessen hätte man wieder eine Ähnliche Struktur wie am Anfang und ein somit in sich geschlossenes und somit vielleicht sogar ewiges Universum.²⁸ Neben all den spekulativen Überlegungen, die man aus dem No boundary proposal ziehen kann, bleibt jedoch vor allem mit der Einführung der imaginären Zeit ein fundamentaler Wandel unserer Vorstellung der Zeit, welche soweit von Newtons linearem Zeitstrahl entfernt ist wie niemals zuvor.

5 Fazit

Nachdem ich mich mehrere Wochen intensiv mit dem Thema der imaginären Zeit und in dem Zuge dessen auch mit dem No boundary proposal auseinandergesetzt

25 Vgl. Hartle, J. B. Und Hawking, S. W., Wave function of the Universe, https://web.physics.ucsb.edu/~quniverse/papers/wave_function_universe83.pdf

26 Hypothetische Menge aller Universen, umfassen zusammen alles was existiert, vgl. Wikipedia, Multiverse, <https://en.wikipedia.org/wiki/Multiverse>

27 Vgl. Phil Halper (aka Skydivephil), Before the Big Bang 5: The No Boundary Proposal, 34:00-35:20, https://www.youtube.com/watch?v=Ry_pILPr7B8&list=PLI15VVOLXZxgHMLFh7vu1TGQUGmev6ksC&index=2

28 Vgl. Wikipedia, Hartle-Hawking State, https://en.wikipedia.org/wiki/Hartle-Hawking_state

habe, ist mir noch einmal deutlich geworden, wie unvorstellbar die Zeit eigentlich ist. Sie ist nach dem No boundary proposal nicht nur eng verwebt mit unserem Raum, sondern war einst als imaginäre Raumzeit nicht einmal unterscheidbar in ihrer Struktur von dem Raum. Die Zeit ist etwas nicht greifbares, man kann sie gut umschreiben und jeder kann sich etwas unter dem Begriff der Zeit vorstellen, doch geht man der Zeit physikalisch auf den Grund, dann trifft man gegebenenfalls auch auf die imaginäre Zeit oder einer der vielfältigen Zeit-Paradoxa nach Einstein und auf einmal scheint etwas so alltägliches wie die Zeit völlig fremd und nicht erklärbar zu sein. Retrospektiv hat sich also mein Blick auf die Zeit geändert und die Ungewissheit, was sich hinter dem Begriff der Zeit verbirgt, ist im Allgemeinen gestiegen. Trotzdem durfte ich mich mit der imaginären Zeit beschäftigen, die die Zeit zu etwas gar völlig anderem werden ließ und die Kosmologie wohlmöglich auch noch viele weitere Jahre beschäftigen wird.

6 Anhang

6.1 Literaturverzeichnis

6.1.1.1 Digitale Literatur

FWU Institut für Film und Bild, (Abruf: 06.03.2025, URL: <https://www.leifiphysik.de/relativitaetstheorie/spezielle-relativitaetstheorie/grundwissen/laengenkcontraktion>)

Gebeshuber, Ille, C. Eine fundierte Einführung in die Zeit, 12. 2007, (Abruf: 06.03.2025), URL: https://www2.iap.tuwien.ac.at/~gebeshuber/ille_zeit.pdf

Gianopoulos, Andrea, Big Bang, 22.10.2022, (Abruf: 06.03.2025), URL: <https://science.nasa.gov/mission/hubble/science/science-behind-the-discoveries/hubble-big-bang/>

Hartle, J. B. Und Hawking, S. W., Wave function of the Universe, 15.12.1983, (Abruf: 06.03.2025), URL: https://web.physics.ucsb.edu/~quniverse/papers/wave_function_universe83.pdf

Mathe by Daniel Jung, Komplexe Zahlen | Mathe by Daniel Jung, 31.07.2023, (Abruf: 06.03.2025), URL: <https://www.youtube.com/watch?v=XHFqRwCQzUs>

Phil Halper (aka Skydivephil), Before the Big Bang 5: The No Boundary Proposal, 07.11.2017, (Abruf: 06.03.2025), URL: https://www.youtube.com/watch?v=Ry_pILPr7B8&t=2129s

Rödel, Volker, Der Minkowski-Raum (Kurzfassung), (Abruf: 06.03.2025), URL: https://www.neue-physik.de/551.0_Minkowski.php

Sabine Hosenfelder, Special Relativity: This is why you misunderstand it, 07.01.2023, (Abruf: 06.03.2025), URL: <https://www.youtube.com/watch?v=ZdrZf4lQTSg&t=810s>

Spektrum Akademischer Verlag, klassische Physik, (Abruf: 06.03.2025), URL: <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/klassische-physik/8062>

Spektrum Akademischer Verlag, Relativitätsprinzip, (Abruf: 06.03.2025), URL: <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/relativitaetsprinzip/12326>

Studyflix, Was ist Lichtgeschwindigkeit?, (Abruf: 06.03.2025), URL: <https://studyflix.de/ingenieurwissenschaften/lichtgeschwindigkeit-2399>

TU. Dortmund, Was sind komplexe Zahlen und wer hat sie erfunden?, (Abruf: 06.03.2025), URL: https://wwwold.mathematik.tu-dortmund.de/sites/funktionentheorie-i-wise-2023-24/download/Komplexe_Zahlen_Historie.pdf

Uni Wien, Spezielle Relativitätstheorie, (Abruf: 06.03.2025), URL: <https://homepage.univie.ac.at/franz.embacher/SRT/Zeitdilatation.html>

Wikipedia, euklidischer Raum, (Abruf: 06.03.2025), URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Euklidischer_Raum

Wikipedia, Doppelspaltexperiment, (Abruf: 06.03.2025), URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Doppelspaltexperiment>

Wikipedia, Heisenbergsche Unschärferelation, (Abruf: 06.03.2025), URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Heisenbergsche_Unschärferelation

Wikipedia, Hermann Minkowski, (Abruf: 06.03.2025), URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Hermann_Minkowski

Wikipedia, Multiverse, (Abruf: 06.03.2025), URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Multiverse>

Wikipedia, Relativitätstheorie, (Abruf: 06.03.2025), URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Relativitätstheorie#:~:text=Die%20Relativitätstheorie%20befasst%20sich%20mit,der%201916%20abgeschlossenen%20allgemeinen%20Relativitätstheorie.>

Wikipedia, Wick-Rotation, (Abruf: 06.03.2025), URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Wick-Rotation>

6.1.1.2 Digitale Literatur (Abbildungen)

Abbildung 1: Mertens, Stephan, Uni Magdeburg, Minkowskis vierdimensionale Raumzeit, WS 2007 (Abruf: 06.03.2025), URL: <https://wasd.urz.uni-magdeburg.de/mertens/teaching/mech/skript/minkowski.pdf>

Abbildung 2: NetMath, Gaußsche Zahlenebene, (Abruf: 06.07.2025), URL: https://netmath.vcrp.de/downloads/Skripte/Vorkurs/HSWildau/KomplexeZahlen/gausche_zahlenebene.html

Abbildung 3: Wikipedia, Hartle-Hawking state, (Abruf: 06.07.2025), URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Hartle-Hawking_state

Abbildung 4: Wikipedia, Doppelspaltexperiment, (Abruf: 06.03.2025), URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Doppelspaltexperiment>

6.1.2 Analoge Literatur

Hertog, Thomas, Der Ursprung der Zeit, Mein Weg mit Stephen Hawking zu einer neuen Theorie des Universums, 2023

Hawking, Stephen, Das Universum in der Nussschale, 2004

6.2 Erklärungen

6.2.1 Erklärung zur eigenständigen Anfertigung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Facharbeit selbstständig angefertigt, keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt und die Stellen der Facharbeit, die im Wortlaut oder im wesentlichen Inhalt aus anderen Werken entnommen wurden, mit genauer Quellenangabe kenntlich gemacht habe.

Ort, Datum, Unterschrift

6.2.2 Erklärung zur Veröffentlichung

Hiermit erkläre ich, dass ich damit einverstanden bin, wenn die von mir verfasste Facharbeit der schulinternen Öffentlichkeit zugänglich gemacht wird.

Ort, Datum, Unterschrift