

Zeitschrift: Schweizer Monatshefte : Zeitschrift für Politik, Wirtschaft, Kultur
Herausgeber: Gesellschaft Schweizer Monatshefte
Band: 53 (1973-1974)
Heft: 2

Artikel: Philosophische Probleme der modernen Physik. Teil I, Fragestellung und Literaturübersicht
Autor: Gosztonyi, Alexander
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-162845>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 10.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Philosophische Probleme der modernen Physik (I)

Fragestellung und Literaturübersicht

Physik und Philosophie

Der Theologe Adolf Harnack meinte, als man auf das – vermeintliche – Stagnieren philosophischen Denkens in den ersten Dezennien des Jahrhunderts hinwies, die Philosophen seien zu dieser Zeit unter den Physikern zu suchen. In der Tat zeigt es sich sogar in der Gegenwart, dass eine Anzahl entscheidender Probleme, die früher fraglos der Philosophie zur Lösung überantwortet, in den letzten fünfzig bis siebzig Jahren von Physikern aufgegriffen, ja überhaupt erst gesichtet wurden. Gewiss verdankt die Philosophie Bergson oder Husserl, die gerade um die Jahrhundertwende ihre scharfsinnige Auseinandersetzung mit der Wirklichkeit der sinnlich erfahrbaren Welt und des Bewusstseins entfalteten, Impulse und Erkenntnisse, welche heute nicht mehr wegzudenken sind. Die Physiker jedoch wurden unabhängig von der Tendenz zur philosophischen Systematisierung von der Sache her geradezu gezwungen, über philosophische Voraussetzungen oder Konsequenzen ihrer Entdeckungen nachzudenken. Die behandelten philosophischen Probleme sind aus diesem Grunde keine Zusätze zur modernen Physik, die man nach Belieben auch weglassen könnte, sondern organisch erwachsene Problemzweige, deren Bearbeitung nicht selten erst auch die Weiterführung der physikalischen Forschung ermöglichte.

Aber nicht nur die Analyse bestimmter Probleme der Philosophie setzt physikalische Kenntnisse voraus. Das neue Weltbild bezüglich der materiellen Struktur der Wirklichkeit wurde offensichtlich durch die moderne Physik ausschlaggebend geformt. Für die Philosophie hat dies zur Folge, dass auch ihre Aussagen über die Zeit, den Raum, das Weltall, aber auch über die der materiellen Struktur zugrunde liegende – nicht-materielle – Wirklichkeit keinen spekulativen Charakter mehr haben dürfen, sondern unter Berücksichtigung naturwissenschaftlicher Kriterien erstellt werden müssen. Daher wird nicht nur eine Kosmologie, sondern sogar eine Ontologie, die um den Aufweis und die Beschreibung der tragenden und konstitutiven Elemente der Welt bemüht ist, auf weiten Gebieten auf die Physik zurückgreifen müssen.

Etliche Physiker, die dazu geführt werden, philosophische Probleme in Angriff zu nehmen, wissen allerdings, dass in der Gesamtschau der Welt die rein physikalische Sicht nicht dominieren darf. Wie Altphilologie oder Soziologie allein kein hinreichendes Fundament zum philosophischen Denken bieten, so auch die Physik nicht. Auch darf dieses Denken durch einseitig physikalische Betrachtungsweise nicht deformiert werden. Eine solche Anomalie würde zur Verabsolutierung der Physik und letztlich zum Materialismus führen. Es ist daher kein Zufall, wenn beinahe alle schöpferischen Physiker dieses Jahrhunderts die nicht-materiellen Zusammenhänge als das Grundlegende erkannt haben und viele von ihnen sich sogar zum Platonismus bekennen.

Über die wichtigsten «Philosophischen Probleme der modernen Physik» bietet *Peter Mittelstaedt* eine gründliche, anspruchsvolle Darstellung, die mathematische und physikalische Vorkenntnisse voraussetzt¹. Sie ist für gebildete Laien und Studenten sehr empfehlenswert. – Allgemein verständliche, philosophisch wertvolle Abhandlungen legt *Carl Friedrich von Weizsäcker* in der Aufsatzsammlung «Zum Weltbild der Physik» vor². – Das umfangreiche Werk von *Wolfgang Büchel* über «Philosophische Probleme der Physik» führt dank der Klarheit der Darlegungen und der eingehenden fachkundigen Erörterungen der einschlägigen Fragen sowohl Fachleute als auch Nicht-Physiker in die Problematik vorzüglich ein³. – Eine populäre Darstellung verschiedener – aber nicht aller – aktuellen Fragen der Physik ist in *Eduard Verhülsdonks* Essayband «Signale aus dem Mediokosmos» zu finden⁴. – *Max von Laues* nun schon klassisch gewordene «Geschichte der Physik» ermöglicht es auch Laien, einen guten Überblick über die physikalischen Probleme zu gewinnen, die Anlass zu philosophischen Erörterungen geben⁵.

Die Zeit

Die Notwendigkeit, bis dahin bedenkenlos übernommene Begriffe neu zu deuten, wurde erstmals bei der physikalischen Analyse des Problems der Gleichzeitigkeit offensichtlich. Es zeigte sich nämlich, dass es nur dann einen Sinn hat, von Gleichzeitigkeit zweier Ereignisse zu sprechen, wenn diese tatsächlich in eine unmittelbare zeitliche Relation gebracht, das heisst miteinander zeitlich verglichen werden können. Finden zwei Ereignisse in einer sehr grossen – zum Beispiel kosmischen – Distanz statt, so kann man ihre Gleichzeitigkeit nur in dem Falle behaupten, wenn die zu ihrer Wahrnehmung nötigen Zeiten eliminiert oder zumindest miteinander vergleichbar sind. Bei grossen Entfernungen kommt die Eliminierung der Wahrnehmungszeit nicht in Frage. Der Grund dafür scheint ein plausibler zu sein: Die Signalübertragung von der Stelle des Ereignisses bis zum Beobachtungspunkt braucht Zeit. Heute weiss ja jeder Mittelschüler, dass das Wahrnehmungsbild eines Fixsternes nicht auf seinen gegenwärtigen, sondern auf

den vor einigen Millionen oder Milliarden von Jahren bestandenen Zustand zu beziehen ist. Manche in der «Wirklichkeit» längst erloschene Sterne leuchten an unserem Nachthimmel immer noch, weil das zu ihrer Leuchtzeit ausgesandte Licht die Erde erst jetzt erreicht.

In der klassischen Physik – zum Beispiel für Newton – war dies nicht selbstverständlich. Die Ausbreitung des Lichtes – des damals einzigen bekannten Signalüberträgers auf grosse Distanzen – galt im Gegensatz zur Schallausbreitung als instantan. Für die damalige Kosmologie war diese irrtümliche Auffassung ohne grosse Bedeutung. Ein Zeitgenosse Newtons, Olaus Römer, zog allerdings bereits 1676 aus Beobachtungen über die fast, aber nicht genau periodisch wiederkehrenden Verfinsterungen eines der Jupitermonde den berühmt gewordenen Schluss auf die *endliche* Geschwindigkeit der Lichtausbreitung, die er für den leeren Raum mit $3 \cdot 10^{10}$ cm/sec ziemlich genau angab. Sie beträgt zufolge genauer Messungen $2,99793 \cdot 10^{10}$ cm/sec $\pm 3 \cdot 10^5$ cm/sec. Was hat aber die Lichtgeschwindigkeit mit dem Begriff der Zeit zu tun?

Die Zeit ist in der Physik nur durch ihre Messung fassbar. Für die Zeitmessung benötigt man aber einen Vermittler, der gewissermassen ein «Träger» der Zeit ist. Die Sonnen- und Wasseruhren wie auch die mechanischen Uhren übersetzen die Zeitintervalle in räumliche Relationen, die Zeit wird durch die räumliche Bewegung veranschaulicht und messbar gemacht. Diejenige Bewegung, die geeignet ist, die Zeit im kosmischen Massstab zugänglich zu machen, ist die Fortpflanzung des Lichtes – oder die Ausbreitung von Wellen, deren Geschwindigkeit die des Lichtes erreicht (elektromagnetische Wellen). Die Messungen, die zur Prüfung der Existenz eines den kosmischen Raum erfüllenden Äthers von Michelson (erstmal 1881 und öfters mit Morlay) vorgenommen wurden, zeigten aber, dass die Lichtgeschwindigkeit die höchste erreichbare Geschwindigkeit überhaupt ist, die auch bei gegensinniger Bewegung zweier Beobachtungspunkte (beim Doppler-Effekt) nicht überschritten wird. Einstein konnte auch den Grund dafür angeben: Die Masse von Korpuskeln nähert sich bei der Beschleunigung gegen die Lichtgeschwindigkeit approximativ dem Unendlichen. Überlichtgeschwindigkeit erreichen bloss einzelne, sehr kurzlebige Elementarteilchen (zum Beispiel Mesonen). Die oberste Geschwindigkeitsgrenze gilt aber für die Ausbreitung nicht nur von Licht, sondern von jeder physikalischen Wirkung, so auch von elektromagnetischen Wellenfronten oder einer Gravitationsfront. Die Lichtgeschwindigkeit stellt aber eine grundlegende Konstante für die Zeit dar, die die Zeitmessung ermöglicht. Mit Hilfe dieser Konstante kann auch das Problem der Gleichzeitigkeit neu formuliert werden.

Die Übermittlung von Signalen auf grössere Distanzen braucht Zeit, und

diese messbare Zeit hängt ausser der Distanz selbst von der Geschwindigkeit und der Art der Bewegung (gleichförmig oder beschleunigt) ab, in der sich das System des Signalsenders in bezug auf das System des Signalempfängers befindet. Bei grossen Geschwindigkeiten tritt eine sogenannte «Zeitdilatation» (Ausdehnung) ein: Man «altert» in einer mit sehr hoher Geschwindigkeit fahrenden Raumkapsel «langsamer» als auf der Erde. Je höher nämlich die Geschwindigkeitsdifferenz zwischen zwei Systemen ist, desto mehr verschiebt sich auch die Zeit in beiden Systemen, die «Gleichzeitigkeit» verliert ihren Sinn, indem sie relativiert wird, und synchronisierte Uhren büssen ihre Synchronizität ein.

Zu Operationen mit der Zeit im Kosmos und so auch zur Feststellung von Gleichzeitigkeit genügt also die blossе Zeitangabe nicht, sondern man muss zugleich Angaben über Raumlage und Geschwindigkeit der fraglichen – gemessenen und messenden – Systeme machen. Die Voraussetzung dafür ist, dass die Systeme sich innerhalb eines Bereiches befinden, wo Signalübertragung noch möglich ist. Bewegt sich nämlich ein System mit sehr grosser Geschwindigkeit weg vom Signalsender, der sich in der entgegengesetzten Richtung ebenfalls mit sehr hoher Geschwindigkeit bewegt, so erreicht das Signal das System unter Umständen überhaupt nicht, weil ja auch die Fortbewegungsgeschwindigkeit des Signals begrenzt ist. Untersucht man die möglichen Weltstellen, von denen her Signalübertragung möglich ist, so zeigt sich, dass es *zeitliche* Gebiete gibt (Zukunft und Vergangenheit), aus denen menschliche Beobachter gar keine Signale empfangen können. Da nun auch die physikalischen Wirkungen durch dieselbe Ausbreitungsgrenze beschränkt sind, können von dort her auch keine *kausalen* Wirkungen das uns bekannte kosmische Weltsystem erreichen. Die Zeitgrenze ist zugleich eine Barriere für die Kausalwirkung.

Die Zeit erhielt bei dieser Feststellung offenbar eine «räumliche» Bedeutung. In der Tat musste ein neues Bezugssystem geschaffen werden, das die Auswertung der Gedanken von Einsteins *spezieller Relativitätstheorie* ermöglichte. Minkowski – kurz vor ihm schon Poincaré in Andeutungen – betrachteten die Zeit als eine Dimension, die den drei Raumdimensionen gleichzuordnen ist. Die Zeitachse – eine imaginäre Achse – wurde als gleichartige Koordinatenachse in die Physik eingeführt. Die physikalische Welt besteht laut dieser Auffassung nicht mehr aus Raumpunkten *und* Zeitpunkten, sondern aus einer *Ereignismannigfaltigkeit* in einer *vierdimensionalen* Welt. Mit Hilfe dieses neuen Bezugssystems wurde es möglich, die raum-zeitliche Welt in Gegenden aufzuteilen, aus denen räumliche, beziehungsweise zeitliche Wirkungen auf das uns bekannte kosmische System möglich, beziehungsweise nicht möglich sind. Da die Lichtgeschwindigkeit das Mass und die Grenze für die Ausbreitung von Wirkungen angibt, wurde der mögliche

Wirkungsbereich als *Lichtkegel* bezeichnet – ein Doppelkegel, dessen Spitze das *hic et nunc* bildet und von dem aus sich vorwärts und rückwärts, räumlich und zeitlich, der mögliche Wirkungsbereich kegelförmig öffnet.

Die Zeit wurde somit in der Physik konstitutiv auch für den Raum. Es wurde ferner deutlich, dass die Zeit ohne «Zeitträger» keine Bedeutung haben kann. Nicht nur für die Messung nicht, sondern für die Physik überhaupt. Die Zeit ihrerseits ist jedoch der «Träger» physikalischer – und übrigens auch biologischer und psychischer – Ereignisse.

Über das Zeitproblem orientieren ausser den oben angegebenen Werken der von R. W. Meyer herausgegebene Sammelband «Das Zeitproblem»⁶ und das Rowohlt Sachbuch Nr. 16 von Samuel A. Goudsmit und Robert Claiborne «Die Zeit»⁷. Im erstgenannten Werk sind die Beiträge von Verena Meyer, Rudolf Meyer und Walter Heitler für den vorliegenden Zusammenhang von Bedeutung. Das zweite Werk zeichnet sich durch Klarheit aus, es führt auch Laien in die schwierigen Probleme vorzüglich ein.

Der Raum

Die vierdimensionale Raum-Zeit-Welt, die Minkowski-Welt, hat drei Raumkoordinaten, die den drei Koordinaten der euklidischen Geometrie entsprechen. Sie sind gradlinig und stehen senkrecht aufeinander. In der Praxis, bei kosmischen Messungen etwa, erhebt sich allerdings die Frage, ob das Festhalten an der Gradlinigkeit der Koordinaten zweckmässig sei. Denn was gilt als Gerade im kosmischen Raum? Der Lichtstrahl. Was geschieht aber, wenn er in der Nähe eines Gravitationsfeldes – einer grossen Masse – abgebogen wird? Dann entsteht die Paradoxie einer «krummen Geraden». Hat es dann noch einen Sinn, an der «Gradlinigkeit» von «Geraden» festzuhalten, wenn es in der physikalischen Praxis nur bei – relativ – kleineren Entfernungen «Geraden» gibt? Und wenn vielleicht sogar der Raum selbst gekrümmt ist?

Bereits Gauss verwendete für Messungen irdischer Distanzen *Geodäten*, das heisst Linien, die den Erhebungen und Vertiefungen der Erdoberfläche angepasst sind, und entwarf ein aus solchen Geodäten bestehendes Koordinatensystem, das nach ihm benannt wurde. Bolyai und Lobatschewski entwickelten unabhängig voneinander zwei Arten von Geometrie gekrümmter Flächen, in denen gewisse Sätze der euklidischen Geometrie (das Parallel-Axiom und der Winkelsummensatz der Dreiecke) nicht gelten und die als nicht-euklidische Geometrien bekannt wurden. Riemann schliesslich legte die Wesenszüge einer Nahwirkungsgeometrie nieder, die auf beliebig krumme Fläche anwendbar ist. Der Gedanke aber, dass der physikalische, namentlich der kosmische Raum gekrümmt sein könnte, wurde erst von

Einstein – unter Verwertung von Riemanns Geometrie – in all seinen Konsequenzen entwickelt.

Einstein zeigte in seinen Arbeiten zur *speziellen*, vor allem aber zur *allgemeinen Relativitätstheorie*, dass der kosmische Raum keine an sich bestehende Grösse – etwa ein «Behälter» – ist, die eine eigene, von allen physikalischen Gegebenheiten unabhängige Struktur – zum Beispiel in der Form der euklidischen Geometrie – besitzt, in der sich physikalische Ereignisse abspielen, ohne die Raumstruktur zu beeinflussen oder von dieser beeinflusst zu werden. Der Raum erwies sich in seiner Theorie vielmehr als etwas mit der Materie wesensmässig Verbundenes, von ihr Abhängiges und sie Beeinflussendes. Die Materie erscheint in ihrer Verteilung im Weltall als ein mehr oder weniger dichtes Energiefeld, dessen Dichte die jeweilige – lokale – Raumkrümmung bestimmt. Die geometrische Struktur dieses Energiefeldes hingegen hängt von der Struktur des – gekrümmten – Raumes ab. Dies scheint ein Paradoxon zu sein, das sich auflöst, wenn man bedenkt, dass die Gestalt eines Raumgegenstandes – so auch seine Krümmung – physikalisch nur durch die Verteilung der Materie zugänglich ist, die Verteilung selbst jedoch als eine Funktion der Geometrie des gekrümmten Raumes aufgefasst werden muss. Ein Massenpunkt wandert beispielsweise auf vorgeschriebenen Bahnen im Weltraum, diese Bahnen werden aber von der Raumstruktur vorgezeichnet. Die Gesamtheit solcher Bahnen heisst *Führungsfeld*. Eine geistvolle, wenn auch nicht in allen Einzelheiten brauchbare «Geometrie des Führungsfeldes» wurde im Anschluss an Einstein von dem Mathematiker Hermann Weyl entworfen (in «Raum, Zeit und Materie»).

Wie «sieht» nun dieser Raum aus? Er ist *unanschaulich*. Er kann nur durch Analogiebeispiele einer anschaulichen Vorstellung nähergebracht werden, so zum Beispiel durch Hinweis auf eine Kugel. Dabei gilt die zweidimensionale Kugeloberfläche als ein Analogon zum gekrümmten Raum. Wie nun die Oberfläche des Globus nicht glatt ist, so variiert auch im Weltraum die Krümmung von «Weltstelle» zu «Weltstelle». Er ist – wie auch die Kugeloberfläche, auf der man wandern kann, ohne auf Grenzen zu stossen – *unbegrenzt*, aber *endlich*. Einstein war ferner überzeugt, dass er auch «geschlossen» ist – auch die Kugeloberfläche ist eine endlich grosse, geschlossene Fläche. Manche Astrophysiker neigen heute jedoch dazu, den Weltraum als «offen» zu betrachten. Im Analogiebeispiel müsste man dann nicht auf eine Kugel, sondern auf die Fläche einer Hyperboloid verweisen, die Krümmung wäre nicht «sphärisch», sondern «hyperbolisch». Die Diskussion um Gestalt und Beschaffenheit des Weltraumes gehört aber in den Bereich der Kosmologie, die im nächsten Abschnitt erörtert werden soll.

Vorerst soll jedoch ein Problem des Raumes kurz erwähnt werden, das

von der Quantenphysik gesichtet wurde: das Problem der *kleinsten Länge*. Wie Heisenberg erstmals 1938 mitteilte, bestehen wichtige Gründe zur Annahme, dass es in der Natur eine kleinste Längeneinheit gibt, die nicht unterboten werden kann. Sie kann mit 10^{-13} cm angegeben werden und ist so klein, dass sie in der klassischen Physik nicht bemerkt werden konnte. Die Länge wird durch drei Erfahrungstatsachen bestimmt: 1. Sie entspricht der Länge des «klassischen» Radius des Elektrons, 2. sie ist so gross wie der Wirkungsbereich der Kernkräfte, 3. die kritische Energie von 10^8 Elektron Volt entspricht einer Wellenlänge von 10^{-13} cm. – Diese Länge scheint tatsächlich einen Wert darzustellen, der ohne Zerstörung der Kernkraft nicht unterboten werden kann. Trifft dies zu, so bedeutet dies die *Diskontinuität* des Raumes: Es gibt dann eine kleinste Raumeinheit, die physikalisch nicht mehr teilbar ist. Ausserhalb des atomaren Bereichs hingegen kann man von der Kontinuität des Raumes sprechen, da für grössere Raumabschnitte die kleinste Länge als verschwindend klein gelten kann. – Es sei noch daran erinnert, dass bei Abgabe von Energie nur diskrete Energiestufen möglich sind – ein Sachverhalt, den Planck mit der Einführung des von ihm benannten Wirkungsquantums zum Ausdruck brachte. So ist auch die Energiestrahlung diskontinuierlich.

Eine hervorragende Darstellung von Einsteins Leistung für die Physik legt *Pascual Jordan* in seiner Monographie «Albert Einstein» vor⁸. Bei aller Hochachtung vor dem genialen Lebenswerk dieses grossen Revolutionärs der Physik weist Jordan auch auf die Grenzen Einsteins, die sich etwa bei seiner Ablehnung bestimmter Deutungen von Phänomenen in der Quantenphysik bemerkbar machen. Diese Deutungen erwiesen sich später als richtig. Einen sehr wichtigen Impuls zur Quantentheorie lieferte interessanterweise gerade der junge Einstein in seiner ersten Veröffentlichung. Jordans Buch, das Einstein durchaus gerecht wird, eignet sich auch als eine sehr gute Einführung in die moderne Physik und bietet eine gute Übersicht über die physikalischen Probleme, die mit Einsteins Arbeiten in Zusammenhang stehen. – In die Forschung und die Probleme, die sich bei der praktischen «Eroberung» des Raumes, bei der Raumfahrt, stellen, führt dankenswert instruktiv das Rowohlt-Sachbuch Nr. 17 von *Arthur C. Clarke* «Mensch und Weltraum» ein⁹. Das Buch behandelt auch Fragen der Aerodynamik und der Astrophysik in verständlicher Weise. – Vom Verfasser dieses Aufsatzes wird demnächst eine umfassende Darstellung des Raumproblems erscheinen, die sowohl die Geschichte der Raumvorstellung von der Antike bis heute als auch die verschiedenen Aspekte der Erfahrung vom Raum (Raumwahrnehmung, Sinnespsychologie und Phänomenologie des Raumes) behandelt und die Fragen des physikalischen Raumes ausführlich erörtert¹⁰.

Die Kosmologie

Die Diskussion des Raumproblems führte unmittelbar zur Erörterung kosmologischer Fragen. Im Vordergrund stand zunächst die Frage, inwiefern die allgemeine Relativitätstheorie, die unter anderen den Einfluss der Gravi-

tation auf die Raum-Zeit-Struktur der Welt untersuchte, als Basis einer neuen Kosmologie dienen kann. Analysen darüber führten Einstein, de Sitter, Friedmann, Lemaître und andere durch und entwarfen mathematische «Weltmodelle», in denen die physikalischen Bedingungen nur in der Form des berühmten «kosmologischen Gliedes» (λ) berücksichtigt wurden. Manche Modelle kamen auch ohne dieses Glied aus. Einige Modelle von de Sitter und Friedmann zeigten wiederum, dass die Annahme, das Weltall wäre nicht statisch, sondern expandiere von einem im begrenzten Zeitabstand liegenden Zeitpunkt der Vergangenheit an, nicht ausgeschlossen werden darf.

Edwin Hubble entdeckte 1928 Rotverschiebungen in den Spektren entfernter Galaxien (Milchstrassensysteme) und deutete diesen von ihm benannten Effekt als Zeichen dafür, dass diese Systeme sich mit grosser Geschwindigkeit von unserem Milchstrassensystem entfernen. Diese Deutung legte den Schluss nahe, dass der Kosmos expandiert. Das Modell eines expandierenden Kosmos wurde damit ausgezeichnet, die Möglichkeit seiner Existenz erfuhr eine experimentelle Bestätigung, für viele Physiker wurde die Expansion bald eine Tatsache. Selbst Theorien, die ein stationäres Weltmodell voraussetzten (Stady-State Cosmology von H. Bondi, T. Gold und F. Hoyle), mussten das Phänomen der Expansion erklären, die Erklärungen blieben aber bis heute unbefriedigend.

Die Expansionstheorie liess auch erkennen, dass die Vorstellung vom Kosmos, die bis dahin als gültig angesehen wurde, den Erkenntnissen der astrophysikalischen Forschung nicht mehr entsprach. Noch Einstein glaubte, an einem *statischen* Weltbild festhalten zu können, das durch seine eigenen Einsichten in die Struktur des Raumes im Grunde bereits überholt wurde. Im statischen Weltbild schwang immer noch die Vorstellung des Raumes als eines «Behälters» mit. Die Unanschaulichkeit des Raumes liess indes die Möglichkeit offen, dass der Raum von Stelle zu Stelle erst *erzeugt* wird, und dieser Gedanke kam der Expansionstheorie eher entgegen. Die Ausbreitungsfront der Expansion konnte nämlich als *raumerzeugend* angesehen werden. Nur durfte man sich dabei keine Kugel vorstellen, deren Radius sich unaufhörlich erweitert, denn eine solche Vorstellung setzt den Raum bereits voraus, in dem sich die Kugel befindet. Überdies behauptete die Expansionstheorie auch nicht, dass das Weltall kugelförmig sei. Eine anschauliche Vorstellung des Raumes hingegen führt zur Paradoxie, dass der Raum vorausgesetzt werden muss, wenn man seine «radial verlaufende Erzeugung» allzu wörtlich nimmt.

Die erste und nächstliegende Folgerung aus der Expansionstheorie lautete: Wenn man die Expansion rückwärts verfolgt, so gelangt man – räumlich und zeitlich – zu einem Punkt, an dem die gesamte Materie in

einer äussersten Konzentration auf einem minimalen Umfang zusammengeballt war. In diesem Zustand – im Zustand kosmologischer Singularität – herrschten wegen der übergrossen Materiedichte völlig andere physikalische Verhältnisse als heute. Der Materie-Klumpen – das «Uratom» nach der Bezeichnung von Lemaître, das keine grössere Ausdehnung haben soll als der Abstand Erde–Sonne – explodierte. Mit dieser Explosion – mit dem «Urknall» – begann die Existenz des uns bekannten Kosmos. Die während der Explosion ausgeschleuderte Materie verdichtete sich später zu Galaxien, in welchen sich dann nach und nach Sterne bildeten.

Der Zeitpunkt der Urexplosion kann bestimmt werden, wenn die Beziehung zwischen Entfernung und Geschwindigkeit der Galaxien bekannt ist und vorausgesetzt wird, dass die Geschwindigkeiten sich nicht geändert haben. So kann man das «Alter des Kosmos» berechnen, das mit rund 10^{10} (Milliarden) Jahren angegeben werden kann. Es ist von derselben Grössenordnung wie das aus Farben-Helligkeits-Diagrammen und anderen Indizien bestimmte Alter der Galaxien, insbesondere unserer Milchstrasse. Das Alter der Erde mit $4,5 \cdot 10^9$ Jahren ist ungefähr dreimal kleiner. Eine kleine Korrektur am Alter des Kosmos ist aber insofern nötig, als die Galaxien sich gegenseitig durch die allgemeine Gravitation anziehen und dadurch sich die Geschwindigkeit der äusseren Teile der explodierenden Wolke allmählich verringert. Die Berücksichtigung dieses Effekts ergibt eine etwas kleinere Zeit.

Da die kosmologische Singularität ein Zustand ist, in dem vom heutigen vollkommen abweichende physikalische Verhältnisse herrschten, kann man über den «Uranfang» des Kosmos nur mehr oder weniger berechnete Vermutungen aufstellen. Er stellt zugleich einen *Grenzzustand* dar, was bedeutet, dass weder mathematische noch physikalische Aussagen darüber möglich sind, wie die Bedingungen vor diesem Zustand waren. Ebenso sinnlos ist es, von Raum und Zeit bezüglich des Zustandes vor dem Urzustand zu sprechen.

Die physikalischen Folgen einer Urexplosion müssen hingegen selbst im gegenwärtigen Zustand des Kosmos ihre Spuren hinterlassen haben. So wies man darauf hin, dass die explosionsartige Aussendung von Materieteilchen unter Entbindung von extrem hoher kinetischer, thermischer und Strahlungs-Energie vor sich ging, die im Weltraum heute noch in entsprechend abgeschwächter Form vorgefunden werden muss. Tatsächlich wurde durch radioastronomische Beobachtungen 1965 die sogenannte 3°-Kelvin-Strahlung entdeckt, eine Wärmestrahlung 3° (genauer 2,7°) C über dem absoluten Nullpunkt, die den Raum in allen Richtungen gleichmässig erfüllt. Diese im Millimeter-Wellenbereich liegende Strahlung scheint die Explosionstheorie zu bestätigen. Gegen die Theorie spricht wiederum eine Strah-

lung in einem noch kürzeren Wellenlängenbereich, die durch Messungen aus Raketen entdeckt wurde und hundertmal stärker ist, als es mit der Explosionstheorie vereinbar wäre.

Einige Astrophysiker – so O. Klein und H. Alfvén – sind daher der Meinung, dass die Theorie, wonach nur eine einzige riesige Explosion die Geburt unseres Kosmos ermöglichte, abgeändert werden muss. Man darf diese Explosion nicht für die Entstehung des ganzen Weltalls in Anspruch nehmen. Eine Explosion bewirkt die Entstehung einer Galaxie oder einer Gruppe, beziehungsweise eines Systems von Galaxien: der Metagalaxie. Diese darf jedoch nicht als die einzige und einmalige angesehen werden, denn andere Metagalaxien können immer wieder entstehen. Die beobachtete hohe Strahlungsenergie bei den sogenannten Quasars (quasistellaren Radioquellen) kann als Zerstrahlung von Materie und Antimaterie bei der Entstehung von Galaxien gedeutet werden. (In der Antimaterie sind die elektrischen Ladungen der Teilchen vertauscht: Während im Atom der gewöhnlichen Materie der Kern positiv und die Elektronen negativ geladen sind, sind in der Antimaterie der Kern negativ, die Elementarteilchen um den Kern positiv geladen, letztere heissen darum Positronen.) Gemäss jener Ansicht würden einzelne Teile des Kosmos explosionsartig entstehen, andere wiederum bereits zerfallen, wobei die Expansion nur für Teilgebiete des Kosmos besteht.

Die Richtigkeit dieser neuen Theorie muss durch Beobachtungen und Messungen noch bestätigt werden. Entdeckungen von Objekten jenseits der bisher bekannten Galaxien lassen allerdings heute schon erkennen, dass der Kosmos grösser sein dürfte, als man es noch vor fünfzig Jahren meinte. Es scheint ferner, dass er in seiner Gesamtheit sich nicht unbedingt in einer einheitlichen Expansion befinden muss. Auch wenn andere – sehr fern liegende – Teilgebiete expandieren, so müssen sie nicht aus derselben Explosion hervorgegangen sein.

Da die Beobachtungen keinesfalls bis an die Grenzen des Weltalls dringen können, ist es korrekt, wenn man zwischen Kosmos und Universum unterscheidet. Als *Kosmos* kann man das physikalisch beobachtbare und in die mathematischen «Weltmodelle» einbeziehbare Gebiet bezeichnen. Dieses ist beschränkt, hängt von der Reichweite der Beobachtungsmöglichkeit ab und wird vermutlich immer mehr erweitert. Als *Universum* hingegen kann das ganze Weltall gelten, zu dem auch jene unentdeckten Gebiete gehören, deren Existenz dem Menschen vielleicht nie zugänglich sein wird. Während der Kosmos endlich, aber offen ist, ist das Universum als unendlich zu betrachten.

Die physikalischen Begriffe von Raum und Zeit gelten jedoch nur für den Kosmos. Es hat ja keinen Sinn, sie auf eine Grösse zu beziehen,

für die keine physikalischen Aussagen möglich sind: Auch mathematische Weltmodelle gelten daher nur für den Kosmos. Der Begriff des Universums bedeutet daher im Grunde nur die Möglichkeit, neben dem uns bekannten Kosmos die Existenz anderer Welten anzunehmen.

Die moderne Kosmologie hat auch einen *theologischen Aspekt*. Die oben skizzierte Entstehungstheorie des Kosmos ermöglichte es, die jüdisch-christliche Schöpfungsgeschichte als deren symbolische Darstellung anzusehen, man musste nur den «Urknall» als die ursprüngliche Schöpfungstat Gottes betrachten. Diese Auffassung führte u. a. dazu, eine Evolutionstheorie zu vertreten, in der die Entwicklung vom «Urbeginn» – von der ersten und einzigen Explosion – an über die Entstehung des Sonnensystems und der Erde zur Entstehung des Lebens und des Menschen führte – und zwar in *grosso modo gradlinig*: als ein einmaliges, irreversibles Geschehen. Dass die Explosionstheorie die Existenz der Materie *vor* dem «Urknall» voraussetzen muss, und dass der Annahme der Existenz einer Welt auch *vor* der «Urexplosion» nichts im Wege steht, beachtete man nicht. Es ist allerdings richtig, dass man den Anfang *unserer* Welt an jenem Punkt kosmischer Singularität ansetzen kann. Wenn sich jedoch die Theorie der dauernden Entstehung und Auflösung von Galaxien bewahrheiten sollte, so kann folgerichtig kein Teilgebiet als besondere «Schöpfung» ausgezeichnet werden. Dann muss man vielmehr annehmen, dass das Universum schon vorher – seit «unendlich langer Zeit» – bestand, in ihm indes immer neue Teilgebiete – so auch unser Kosmos – entstanden und entstehen. Diese Annahme steht zu einer bestimmten – nämlich allzu wörtlichen – Interpretation der biblischen Genesis in Widerspruch, nicht aber zu dieser selbst. Denn gerade die altjüdische Überlieferung, die auch den Frühchristen bekannt war, lehrt, dass die biblische Schöpfungsgeschichte die Erschaffung der Welt beschreibt, wie sie sich «in den Gedanken Gottes» ereignete, nicht aber die faktische (materielle) Entstehungsgeschichte. Die Interpretation der Genesis als Evolutionstheorie ist daher bereits eine Projektion von möglichen Sachverhalten auf die *materielle* Ebene und darum eine Verengung des biblischen Berichtes. Wenn nämlich die Schöpfung eine ideelle Tat ist, so bedeutet dies, dass sie sich in einer völlig anderen Wirklichkeitssphäre (symbolisch ausgedrückt: «in Gedanken Gottes») vollzog. Folgerichtig vertritt dann die altjüdische Tradition die Ansicht, dass es neben der unsrigen noch viele andere Welten geben kann oder sogar gibt und nach dem Untergang unserer Welt noch andere, neue entstehen werden. Die wiederholte Entstehung neuer Welten bedarf jedoch keiner eigenen Akte der Schöpfung, sondern nur der Realisierung der nur einmal – in einer anderen Wirklichkeitssphäre – erfolgten Erschaffung des Universums. – Mit diesen Bemerkungen

kungen soll angedeutet werden, dass Aussagen, die in einer anderen Wirklichkeitssphäre gültig sind, nicht auf physikalische Verhältnisse bezogen werden können.

Einen gedrängten, sehr anspruchsvollen Überblick über die mathematischen und physikalischen Probleme der modernen Kosmologie gibt *Hans-Jürgen Treder* in seinem Buch «Relativität und Kosmos»¹¹. – *Albrecht Unsölds* umfassende, sehr klare Darstellung der Entwicklung und der Fragen der modernen Astronomie und Kosmologie «Der neue Kosmos», die auch alle wichtigen Forschungsergebnisse berücksichtigt, ermöglicht allen Interessenten mit oder ohne Vorbildung eine ausgezeichnete Information¹². – Leicht verständlich und instruktiv ist die Schrift von *Hannes Alfvén* über «Kosmologie und Antimaterie»¹³. Alfvén führt darin seine Kritik der Entstehungstheorie des Kosmos aus und gibt Auskunft über das Problem der Antimaterie im kosmischen Raum. – Eine gemeinverständliche Einführung in die Astronomie legt *Joachim Störig* in «Knaurs Buch der modernen Astronomie» vor, die die moderne Astronomie von ihren Anfangsgründen bis zu den neusten, teils noch spekulativen Theorien umspannt, wobei der Verfasser gesicherte Ergebnisse von reinen Spekulationen unterscheidet¹⁴.

¹Peter Mittelstaedt, Philosophische Probleme der modernen Physik, Hochschul-taschenbuch Nr. 50/50a, Mannheim 1968.

– ²Carl Friedrich von Weizsäcker, Zum Weltbild der Physik, Stuttgart 1970¹¹.

³Wolfgang Büchel, Philosophische Probleme der Physik, Freiburg/Basel/Wien 1965. – ⁴Eduard Verhülsdonk, Signale aus dem Mediokosmos – Sterne, Technik und Atome, Frankfurt/M. 1970. – ⁵Max von Laue, Geschichte der Physik, Frankfurt/M./Berlin 1966⁴ (Ullstein Buch Nr. 222).

– ⁶R. W. Meyer (Herausgeber), Das Zeitproblem im 20. Jahrhundert, Bern-München 1964 (Sammlung Dalp Band 96). – ⁷Samuel A. Goudsmit und Robert Claiborne, Die Zeit, Reinbek 1970 (Rowohlt Bildsachbuch Nr. 16). – ⁸Pascual Jordan, Albert Einstein – Sein Lebenswerk und die Zukunft der Physik, Frauenfeld-Stuttgart

1969. – ⁹Arthur C. Clarke, Mensch und Weltraum, Reinbek 1970 (Rowohlt Bildsachbuch Nr. 17). – Vgl. auch Gerhard Schwarz, Raum und Zeit als naturphilosophisches Problem, Freiburg-Basel-Wien 1973. – ¹⁰Alexander Gosztonyi, Der Raum – Ein Beitrag zur philosophischen Problemgeschichte, Freiburg i.Br. (erscheint voraussichtlich 1974). – ¹¹Hans-Jürgen Treder, Relativität und Kosmos, Berlin-Oxford-Braunschweig 1968 (Wissenschaftliche Taschenbücher Nr. 52). – ¹²Albrecht Unsöld, Der neue Kosmos, Berlin-Heidelberg-New York 1967 (Heidelberger Taschenbücher Nr. 16/17). – ¹³Hannes Alfvén, Kosmologie und Antimaterie – Über die Entstehung des Weltalls, Frankfurt/M. 1969². – ¹⁴Joachim Störig, Knaurs Buch der modernen Astronomie, München/Zürich 1970.

(Fortsetzung in einem der nächsten Hefte)