

# Zur Kulturgeschichte des physikalischen Raums

Jochen Koubek; Humboldt-Universität zu Berlin

## **Einführung**

„Der Weltraum, unendliche Weiten.“ So beginnt die erfolgreichste Science-Fiction Serie seit 1966: Star Trek. Um aber diesen Satz überhaupt formulieren zu können, ist eine Raumvorstellung notwendig, die es in dieser Form nicht immer gegeben hat. Die Idee eines unendlichen Raums ist kulturhistorisch relativ jung und löste erst seit dem 17. Jahrhundert das letztlich auf Aristoteles zurückgehende Raumverständnis des Mittelalters ab.

Zwar können wir davon ausgehen, daß sich die physiologischen Voraussetzungen der Raumwahrnehmung im Laufe der Zeit wenig geändert haben, dennoch unterlag die Vorstellung des Raums und die damit verbundenen Konnotationen tiefgreifenden Veränderungen, von denen ich einige anhand der Meilensteine physikalischer Theorien im folgenden nachzeichnen werde.

Aus Zeitgründen verzichte ich auf wissenschaftshistorische Details und konzentriere mich auf das kulturgeschichtliche Umfeld der jeweiligen Theorie, die ihrerseits als mathematische Formulierung einer bestimmten Naturphilosophie interpretiert werden kann; Kulturgeschichte, nicht Theoriegeschichte ist Schwerpunkt der Darstellung<sup>1</sup>. Die vorgestellten Theorien formuliere ich in der Sprache der Relativitätstheorie<sup>2</sup>, ein gänzlich a-historisches Vorgehen, durch welches die Theorien aber in ihren Aussagen vergleichbar und letztendlich einfacher darstellbar werden, weil eine einzige Terminologie zur Beschreibung ausreicht.

Ein *Ereignis* findet statt in einem kleinen Raumabschnitt innerhalb kurzer Zeit. Im Laufe seiner Existenz durchläuft ein Objekt verschiedene Ereignisse, die seine Geschichte ausmachen. Sie wird in einem *Raum-Zeit-Diagramm* als *Weltlinie* abgebildet, üblicherweise mit einer Dimension des Raums auf der Abszisse und der Zeit auf der Ordinate. Die *Raumzeit* ist die Menge aller möglichen Ereignisse im Universum, sie wird mathematisch modelliert durch einen 4-dimensionalen Vektorraum. Jeder Punkt in der Raumzeit ist ein Ereignis. Verschiedene Theorien haben unter dieser Sicht die Gestalt der Raumzeit unterschiedlich interpretiert.

## **Aristoteles und das Ptolomäische Weltbild**

Aristoteles war vor allem ein systematischer Philosoph dem es darum ging, die Gesamtheit seiner Beobachtungen unter einheitlichen Prinzipien zu ordnen. In seinem Interesse für Bewegung ging er davon aus, daß alle Dinge sich normalerweise in Ruhe befinden und einen äußeren Anstoß brauchen, um sich überhaupt zu bewegen. Fällt die Anregung weg, streben sie dem Mittelpunkt des Kosmos entgegen, wobei die Fallgeschwindigkeit mit der Masse des Objektes steigt. Die schwere Erde setzte Aristoteles daher in den Mittelpunkt des Kosmos, obwohl ihm andere Kosmologien bekannt waren. E.Dijksterhuis schreibt dazu: „Er hat sicher

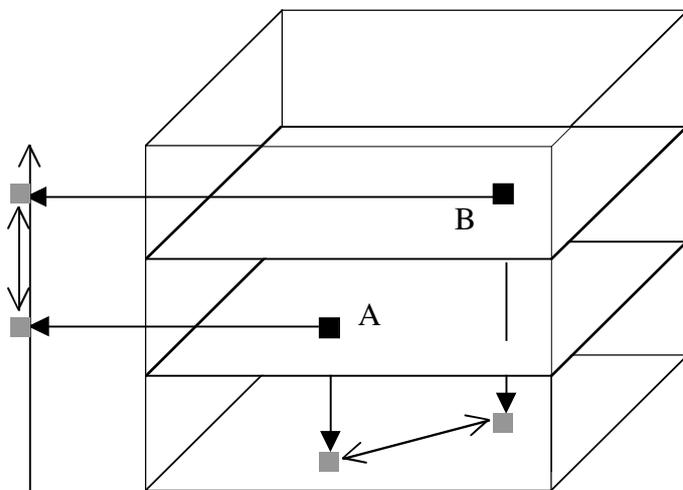
---

<sup>1</sup> Eine allgemeinverständliche Einführung in die physikalische Theoriegeschichte des Raums ist z.B. *Die illustrierte kurze Geschichte der Zeit* von Stephen Hawking.

<sup>2</sup> Hier orientiere ich mich an dem Artikel *Philosophie und Geschichte von Raum und Zeit* von K.Mainzer in Audretsch; Mainzer *Philosophie und Physik der Raum-Zeit* sowie dem Text *The Light Cone* von Rob Salgado.

das Weltbild des Philolaos gekannt, in welchem die Erde um ein zentrales Feuer rotierend gedacht wurde, und möglicherweise auch das des Herakleides von Pontos, in welchem ihr wahrscheinlich sowohl eine Rotation um die Achse als auch eine Bewegung in einem Kreis zuerkannt wurde.“<sup>3</sup>. Diese Vorstellungen aber ließen sich nicht in Übereinstimmung mit Aristoteles systematischer Naturphilosophie bringen, so daß er sich für ein geozentrisches Weltbild entschied. Die Idee, daß jedes Objekt sich normalerweise in Ruhe befindet, solange es nicht durch eine äußere Anregung bewegt wird, bedingt die Existenz eines ersten Bewegers, der sich selber nicht bewegt, für die Bewegung aller anderen aber direkt oder indirekt verantwortlich ist.

In unsere Sprache übersetzt bedeutet dies, daß Aristoteles die Raumzeit wie folgt interpretierte:



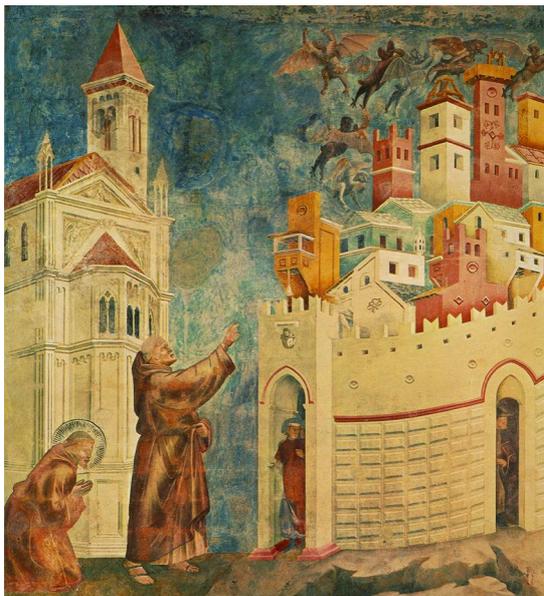
der Kubus repräsentiert die 4–dimensionale Raumzeit. Ereignisse auf jeder horizontalen Ebene finden gleichzeitig statt; der zeitliche Abstand zweier Ereignisse A und B ist der Abstand der Projektion von A und B auf eine vertikale Achse, der räumliche Abstand ist der Abstand der Projektionen von A und B auf eine gemeinsame horizontale Ebene. Die Weltlinie des ersten Bewegers ist eine senkrechte Gerade, weil dieser in absoluter Ruhe ist. Alle Personen sind sich über diese Ruhe einig, Geschwindigkeit ist laut Aristoteles absolut, weil es einen sicheren Ruhepunkt gibt. Ebenso ist die Zeit absolut, weil die Dauer zwischen je zwei beliebigen Ereignissen meßbar und die Messung überall gleich ist.

Ptolomäus formte im 2.Jahrhundert n.Chr. das Aristotelische Weltbild aus, begrenzte das Universum auf die Erde im Zentrum und verteilte die Sonne, den Mond, die fünf bekannten Planeten und die Fixsterne auf acht Sphären, die an die Atmosphäre anschlossen und sich kreisförmig um die Erde drehten. Um die komplizierten Bahnen der Planeten zu erklären führte Ptolomäus kleinere Kreise ein, die Epizyklen, auf denen sich die Planeten in ihren Sphären drehten. Was jenseits der äußersten Sphäre lag, blieb ungeklärt, auf jeden Fall war es für Menschen unergründlich. Die aufstrebende christliche Kirche akzeptierte das Ptolomäische Weltbild, ließ es sich doch einfach mit der Bibel in Übereinstimmung bringen: Die Vorstel-

<sup>3</sup> Dijkserhuis *Die Mechanisierung des Weltbildes* S.36

lung eines ersten Bewegers paÙte gut zum christlichen Monotheismus. Die Unbestimmtheit jenseits der äußeren Sphären ließ genügend Platz für den spirituellen Raum.

Das mittelalterliche Raumverständnis war zutiefst dualistisch: Die griechische Trennung von *soma* und *pneuma* verband sich mit jüdischer Spiritualität zu der Trennung von Körper und Seele. Beide hatten ihren Sphären, es gab den Raum des Körperlichen und den Raum des Seelischen. Bedingt durch die Vergänglichkeit des Körpers und die Unsterblichkeit der Seele lag der Schwerpunkt des mittelalterlichen Interesses klar auf dem spirituellen Raum, dessen Hierarchien und Ordnungen in der Kunst dargestellt wurden. Die aus heutiger Sicht oft merkwürdige Raumlosigkeit mittelalterlicher und byzantinischer Malerei begründet sich nicht durch eine andere Wahrnehmung des physikalischen Raumes, sondern durch eine kulturelle Entscheidung, den für die Menschen wichtigeren Raum des Geistigen nachzubilden: Die mittelalterliche Malerei ist symbolisch. Die Bedeutung einer Person wurde durch ihre Größe symbolisiert, eine goldene Aura deutete die Anwesenheit Gottes an, individuelle Gesichtszüge wie sie beispielsweise die Portraitmalerei bestimmt, spielten noch keine Rolle etc. Es herrschte eine starke Einteilung des Raumes in verschiedene Zonen unterschiedlicher emotionaler Qualitäten, vor allem gab es noch kein Verständnis eines einheitlichen Raums, wie wir es heute kennen. In der Kunstgeschichte wird dies in der Regel an dem Übergang zur Perspektive gezeigt:



Giotto: Die Vertreibung der Dämonen aus Arezzo



Giotto: Das jüngste Gericht

Giottos Fresken über das Leben des hl. Franziskus in Assisi und das Leben Christi in der Arena-Kapelle in Padua müssen auf die seine Zeigenossen revolutionär gewirkt haben, bemühten sie sich doch zum ersten Mal um eine realistische Darstellung des physikalischen Raums<sup>4</sup>. Giotto malte so, wie er die Dinge sah und nicht so, wie er sie interpretierte, der Betrachter erlebte die Heilsgeschichte realistisch mit, eine erste Form der Virtual Reality, wie Margaret Wertheim betont<sup>5</sup>. Dem perspektivisch geschulten Blick fällt bei seinen Bildern aber ein

<sup>4</sup> Giottos Bilder sind online einsehbar in der Web Gallery of Art: <http://gallery.euroweb.hu>

<sup>5</sup> Wertheim *The Pearly Gates of Cyberspace*

Bruch innerhalb der räumlichen Darstellung auf: Während z.B. in dem Bild „Die Vertreibung der Dämonen aus Arezzo“ jedes Gebäude in sich räumlich stimmig ist, zerbricht die Konsistenz untereinander. Der Gesamtraum hängt nicht zusammen, ein Problem, was erst durch die Einführung eines einheitlichen Fluchtpunktes in der Perspektive Albertis gelöst wurde. Auch wirken die Zwischenräume flach und gothisch, was mit Augustinus zusammenhängen kann, der den Blick in den Raum als sündhafte Anmaßung ansah, ein Blick, der nur Gott vorbehalten war. Giotto's Vermischung des physikalischen und spirituellen Raums zeigt sich besonders deutlich an seiner Darstellung des jüngsten Gerichts, wo wieder die alten Darstellungsformen vorherrschen. Die letztendlich wahre Ordnung ist auch bei Giotto der spirituelle Raum. Dennoch legte er die Grundlage für die visuelle Vereinheitlichung des Raums, die auch vorangetrieben wurde durch technische Entwicklungen, Entdeckungsfahrten, Kartographien und den als zunehmend weniger sündhaft empfundenen Blick in den Raum und auf Landschaften, wie Petrarca's Brief beim Besteigen des Mount Ventoux belegt<sup>6</sup>.

Die schwindende Autorität des Aristotelischen Weltbildes paarte sich mit dem wachsenden Selbstbewußtsein der Naturforscher, welche die Fehler der Ptolomäischen Planetenbewegung zu korrigieren hofften. Lieferte dessen Modell auch gute Annäherungen so verschwanden nicht wenige Schiffe mit Ladung bei dem Versuch, nach den Planetenbewegungen zu navigieren. Nikolaus Kopernikus versuchte, ein heliozentrisches Weltbild zu entwerfen, er behielt jedoch die Kreisbewegung der Planeten bei, die er auf geeignete Weise verknüpfte. Seine Kosmologie war nicht weniger kompliziert als die ptolemäische, ermöglichte aber eine erste mathematische Formulierung der Heliozentrik durch Johannes Kepler. Dieser verwarf die Kreisbahn und beschrieb Planetenbewegung als elliptisch. Doch sollte die Umstürzung des mittelalterlichen Weltbildes mit dem Namen jenes Mannes verknüpft werden, dem mit dem Teleskop ein astronomisches Instrument zur Verfügung stand, mit dem er die theoretischen Berechnungen visuell überprüfen konnte: Galileo Galilei.

### ***Kepler, Galileo, Newton und der Prä-Relativismus***

Galileo's Untersuchung zum freien Fall führten ihn zu der Behauptung, daß die mechanischen Gesetze für jeden Beobachter gleich bleiben, der sich mit konstanter Geschwindigkeit auf einer geraden Linie bewegt. Galileo bestätigte Keplers Vermutungen bezüglich der Planetenbewegungen durch seine Beobachtung der Jupitermonde, die durch das neue Modell elliptischer Bahnen wesentlich einfacher zu erklären waren als in der Geozentrik. Während Galileo die Kraft, welche die Planeten auf ihren Bahnen hält, noch im Magnetismus vermutete, führte Isaac Newton die Bewegung auf Gravitation zurück und stellte die Kosmologie von Kopernikus, Kepler, Brahe und Galileo auf ein mathematisches Fundament. Die Bündelung der verschiedenen theoretischen Ansätze wird in der Geschichte der Physik unter der Überschrift „Klassische Mechanik“ zusammengefaßt. Deren Entwicklung war kompliziert und verschlungen, sie ließ sich erst im 19. Jahrhundert einheitlich formulieren.

Newton ging nämlich weiterhin von einem entfernten absoluten Ruhepunkt aus, was ihm die Kritik von Leibniz eintrug, der dafür argumentierte, daß es (in unseren Worten) keine Weltlinie gäbe, die vor anderen ausgezeichnet wäre. Nach Leibniz ist die Wahl eines Koordinaten-

---

<sup>6</sup> vgl. Dinzelbacher *Europäische Mentalitätsgeschichte* S.615 ff.

systems lediglich eine Frage der Einfachheit. Es ist demnach egal, ob sich die Sonne um die Erde dreht oder umgekehrt, die Heliozentrik ist allein deshalb die bessere Wahl, weil sie sich besser berechnen läßt. Die Probleme, die sich aus der Einordnung des Trägheitsgesetzes ergab, wurden 1885 von L.Lange durch die Einführung der *Inertialsysteme* gelöst, in welchen die Trägheit erhalten bleibt. Verschiedene Inertialsysteme können über die sog. Galileotransformationen ineinander überführt werden, wenn man ohne Beschränkung der Allgemeinheit von einer gleichförmigen Bewegung des Inertialsystems S' bezüglich des Inertialsystems S in x-Richtung ausgeht:

$$x' = x - ut; y' = y; z' = z; t' = t$$

Die Newtonsche Bewegungsgleichung  $F = m \cdot a$  -Kraft ist gleich Masse mal Beschleunigung, Grundlage der klassischen Konzeption von Raum und Zeit- bleibt bei Anwendung der Galileotransformation unverändert, Beschleunigung ist absolut.

Das letztendlich auf Galileo zurückgehendes Prinzip der Relativität von Bewegung beendete die aristotelische Vorstellung des absoluten Raums, weil kein Inertialsystem für sich absolute Ruhe beanspruchen kann. Zeit aber blieb absolut: Die Gleichzeitigkeit zweier Ereignisse wird aus jedem Inertialsystem heraus erkannt, auch der zeitliche Abstand zweier verschiedener Ereignisse ist in jedem Inertialsystem identisch.

Dies gilt auch für die räumliche Entfernung zweier gleichzeitiger Ereignisse zueinander. Die Setzung der absoluten Zeit bei gleichzeitiger Relativierung des Raums kennzeichnet den Prärelativismus der klassischen Mechanik.

Der Übergang von Geo- zu Heliozentrik wird oft als traumatisches Erlebnis des Menschen charakterisiert, der sich aus dem Zentrum der Schöpfung verschoben sah. Diese Dezentrierung, wenn auch von der Kirche als Widerspruch gegen traditionelle Überzeugungen an sich als häretisch gesehen, bedeutete allerdings mehr einen Aufstieg als eine Degradierung, denn im aristotelischen und somit im mittelalterlichen Weltbild fiel das Schwere zum Zentrum, während das Leichte nach oben stieg. Die Sünde als Gewicht der Seele drängte die Seele des Sünders nach unten in die Hölle, während die des Bußfertigen aufstieg in die himmlischen Sphären. Das materielle, schwere Zentrum kennzeichnet den spirituell minderwertigsten Ort im Kosmos, so daß die Menschen in der neuen kosmischen Hierarchie besser dastanden als zuvor. Das entscheidende Problem des neuen Kosmos war seine prinzipielle Unendlichkeit: Wenn die physikalischen Gesetze überall gleich sind, gibt es keinen Grund mehr, das Universum als begrenzt anzunehmen. Die Fixsterne füllten den Weltenraum, der physikalische Raum dehnte sich und entzog damit der spirituellen Welt im wörtlichen Sinne den Raum. Der Himmel, Gott und die Engel wurden förmlich aus dem Universum gedrängt.

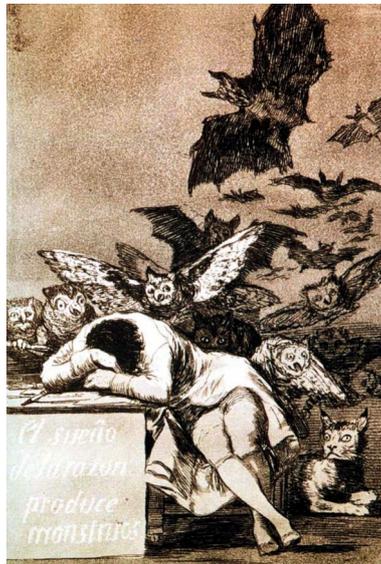
Newton versuchte, das Problem zu umgehen und rettete seine Religiosität in die neuen Raumverhältnisse, indem er das Universum zum *sensorium dei* erklärte. Der Philosoph Berkeley verdächtigte Newton daraufhin des Pantheismus, in welchem Gott mit Natur identifiziert wird. Raum, so Berkely, dürfe nur relativ gedacht werden „oder es gäbe andernfalls etwas von Gott verschiedenes, das ewig, ungeschaffen, unendlich, unteilbar und unveränderlich sei.“<sup>7</sup>Darüber hinaus beruhte das Postulat eines unendlichen Raumes auf keiner empirischen

---

<sup>7</sup> Berkeley in Mainzer *Philosophie und Physik der Raumzeit* S.25

Tatsache und setze einen quasi-religiösen Glauben in die Naturwissenschaft voraus, eine Tendenz die sich im 20. Jahrhundert noch erheblich verstärken sollte.

Descartes Versuch, die Seele in säkularisierter Form als *res extensa* in den Humanismus zu übersetzen, konnten die Auflösung des spirituellen Raums nicht verhindern und gerann im aufstrebenden Empirismus schnell zur Leerformel, zusammen mit der alten spirituellen Ordnung. Das Abendland sah sich im 18. Jahrhundert mit der bis dahin undenkbaren Situation konfrontiert, ein kulturell fest verankertes dualistisches Weltbild einer monistischen, empirischen Weltordnung gegenüberzustellen, „zum ersten Mal in der Geschichte hatte die Menschheit ein reines physikalisches Weltbild, in dem für Geist/Spiritualität/Seele kein Platz mehr war.“<sup>8</sup>Eine wesentliche Ursache dieser Krise lag darin, daß die spirituelle Welt jenseits der Sterne im physikalischen Raum angesiedelt war. Mit seiner Ausdehnung blieb für den Himmel kein Platz mehr. Robert Romansyshyn verweist in diesem Zusammenhang darauf, daß erst mit der Absolutsetzung des physikalischen, perspektivischen Raums die Entwicklungsbedingungen für die Psychologie gegeben war<sup>9</sup>. Die Geister, Engel und Dämonen, denen im neuen Weltbild der Raum entzogen war, wurden in den Menschen verlagert. In Giotto's Bild „Die Vertreibung der Dämonen aus Arezzo“ belagern Dämonen die Stadt Arezzo und können von dem heiligen Franziskus an jenen Ort zurückgetrieben werden, wo sie herkommen. In Goyas „Der Schlaf der Vernunft produziert Monster“ sind die Dämonen nach Innen verlegt, wo sie als Alpträume den Schlaf des Vernünftigen heimsuchen. Erst diese Bewegung ermöglicht und erfordert die Ausprägung einer neuen Wissens-Disziplin, um die Heimsuchungen begrifflich und methodisch zu fassen: die Psychologie, welche z.B. an der Humboldt-Universität zu Berlin noch heute zur mathematisch-naturwissenschaftlichen Fakultät gerechnet wird.



Goya: Der Schlaf der Vernunft produziert Monster

---

<sup>8</sup> Wertheim *The Pearly Gates of Cyberspace* p.152

<sup>9</sup> Romansyshyn *Technology as Symptom and Dream*

Dennoch hat die Wissenschaft es bis heute nicht geschafft, die spirituelle Leere auszufüllen, die sie hinterlassen hat, weswegen viele Menschen sich von ihr abkehren und ihre Wahrheiten woanders suchen.<sup>10</sup>

### ***Einstein und die Relativität***

Im Jahr 1864 vereinte J.C.Maxwell die elektromagnetisch-optischen Entdeckungen der vorangegangenen Jahrhunderte und erforschte das Licht als elektromagnetische Welle. Schon bald stellte sich heraus, daß die Maxwellschen Gleichungen der Elektrodynamik mit der Newtonschen Mechanik in ihrer Formulierung der Galileo-Transformationen unvereinbar waren. Zur Rettung beider Theorien führte man als *ad hoc-Hypothese* die Vorstellung eines Äthers ein, der als ruhendes Bezugssystem den materiellen Träger der Lichtwellen darstellt. Die seit 1881 durchgeführten Experiment von Michelson und Morley sollten die Existenz des Äthers in Bezug auf die Erdbewegung nachweisen: Ein Lichtstrahl wird an einem Halbspiegel geteilt, in Richtung des angenommenen Äthers und rechtwinklig dazu abgestrahlt. Zwei Spiegel in gleicher Entfernung vom Teilungspunkt reflektieren beide Lichtstrahlen, so daß nach ihrem erneuten Zusammentreffen aus Interferenzmustern auf die Geschwindigkeit der Meßapparatur und mit ihr der Erde relativ zum Äther geschlossen werden sollte.

Die erwarteten Interferenzen zeigten sich jedoch nicht, was H.A.Lorentz zu der Vermutung veranlaßte, daß es bei hohen Geschwindigkeiten zu einer Längenkontraktion des Meßstabs relativ zum Äther um den Faktor  $\sqrt{1 - v^2 / c^2}$  kommt, eine Annahme, die das Problem zwar mathematisch löste, sich dabei aber auf Einwirken von Kräften auf den Meßstab stützte, die nicht erklärbar waren.

Einstein hingegen setzte sich für ein gemeinsames Relativitätsprinzip von Mechanik und Elektrodynamik ein und weigerte sich, das ausgezeichnete Inertialsystem des Äthers anzunehmen. Vielmehr postulierte er die absolute Konstanz der Lichtgeschwindigkeit in allen Trägheitssystemen. Die Schlußfolgerungen aus dieser Annahme waren radikal: Wird aus einem fahrenden Zug in Fahrtrichtung ein Lichtstrahl abgeschickt, so addiert sich die Fahrtgeschwindigkeit des Zugs nicht zur Geschwindigkeit des Lichtstrahls. Ist die Geschwindigkeit des Lichtstrahls in beiden Bezugssystemen die gleiche, so bedeutet dies, daß die Uhr im Zug, mit der die Geschwindigkeit gemessen wird, langsamer laufen muß als die Uhr auf dem Boden. Mit anderen Worten: Zeit verläuft relativ zum Bezugssystem, sie ist keine konstante Größe. Die von Lorentz gesetzte Transformation beschreibt damit nicht eine unbegründbare Längenkontraktion bezüglich eines ruhenden Äthers, sondern die Struktur der Raumzeit. Ähnlich wie mechanische Inertialsystem durch die Galileo-Transformation ineinander überführt werden konnten, stellten sich die Maxwell-Gleichungen als forminvariant heraus gegenüber der Lorentz-Transformation:

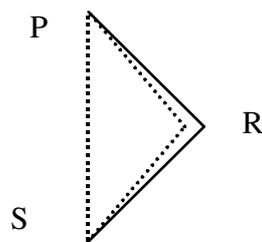
---

<sup>10</sup> Laut Margaret Wertheim ist Cyberspace ein moderner Versuch, einen Ort für die Seele zu finden, den sie in der Aufklärung verloren hat; sicherlich gehört auch die starke Affinität vieler Menschen zur Esoterik in diese Richtung.

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}; \quad y' = y; \quad z' = z; \quad t' = \frac{t - \frac{vx}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Ist die Geschwindigkeit  $v$  deutlich kleiner als  $c$ , so geht die Lorentz-Transformation in die oben angeführte Galileo-Transformation über. Die klassische Mechanik erweist sich somit als angenäherter Spezialfall der Lorentz-Transformationen für kleine Relativgeschwindigkeiten. Diese sauber formulierbare Theoriegeschichte, in der zwei widersprüchliche Theorien in einer dritten aufgehoben werden, also bewahrt, aufgelöst und in abstraktere Höhen erhoben, ist ein vielzitiertes Musterbeispiel für das Konzept des Paradigmawechsels Thomas Kuhns, welcher die Struktur wissenschaftlicher Entwicklung als Serie revolutionärer Umbrüche zeichnet<sup>11</sup>. Die Vorstellung eines absoluten Raumes und einer getrennten Zeit, die unseren Weltlinien bislang zugrunde lag, wurde in der erweiterten Theorie aufgegeben und zu einer vierdimensionalen Raumzeit zusammengefaßt, eine Leistung, die auf H.Minkowski zurückgeht: “Von Stund an sollen Raum für sich und Zeit für sich völlig zu Schatten herabsinken, und nur noch eine Art Union der beiden soll Selbständigkeit bewahren.”<sup>12</sup> Mit der Lichtgeschwindigkeit als absolute Grenze ist die Weltlinie, also Zukunft und Vergangenheit, eines Ereignisses E nur noch innerhalb eines Kegels zu suchen, den ein von E ausgehender Lichtstrahl in der Raumzeit aufspannt. Es gibt Ereignisse, die weder zur Vergangenheit noch zur Zukunft von E gehören. Kausalität wirkt nicht mehr von einer beliebigen Vergangenheit in jede Zukunft, sondern ist ebenfalls in den Lichtkegel gebunden. Die Gleichzeitigkeit zweier Ereignisse ist nur noch relativ zu einem Beobachter festzustellen.

Eine direkte Konsequenz der neuen Raumzeit ist das Zwillingsparadoxon:



Fliegt von einem Zwillingspaar einer der beiden mit einem Raumschiff nahe der Lichtgeschwindigkeit geradlinig in eine Richtung SR und kehrt danach zum Ausgangspunkt zurück, ist sein am Ausgangspunkt verbliebener Bruder älter als er. Die Verbindung der Weltlinien von S nach P dauert in der 4-dimensionalen Raumzeit länger als die Wege SR und RP, was darin begründet ist, daß die Zeit mit wachsender Geschwindigkeit langsamer läuft. Diese Folgerung wird experimentell durch die Lebensdauer von Myonen bestätigt, die sich relativ zur Erde nahe der Lichtgeschwindigkeit bewegen und somit deutlich länger stabil bleiben, als im Ruhezustand (relativ zur Erde).

<sup>11</sup> Kuhn *Die Struktur wissenschaftlicher Revolution*

<sup>12</sup> H. Minkowski, *Raum und Zeit*

Einsteins spezielle Relativitätstheorie bricht mit der Anschauung und trennte die mathematische Physik endgültig vom interessierten Laien, der ihre Ergebnisse nur noch mit Erstaunen nachvollziehen konnte. Die vierdimensionale Struktur der Raumzeit, in der Raum und Zeit untrennbar verknüpft sind, läßt sich mathematisch zwar beschreiben, aber nur noch in Analogien veranschaulichen. Dies ist auch der Weg, den ich im folgenden beschreiten werde, wenn ich lediglich Veranschaulichungen anführe, mit denen die Physik des 20. Jahrhunderts dem populärwissenschaftliche Bedürfnis entgegenkommt<sup>13</sup>.

Die abstrakte Raumzeit der speziellen und der allgemeinen Relativitätstheorie stieß zunächst noch auf Widerstand und löste eine heftige Weltanschauungsdiskussion aus, an der sich neben Albert Einstein u.a. Henri Bergson, Werner Heisenberg, Moritz Schlick, Hermann Weyl, Hans Reichenbach und Ernst Cassierer beteiligten. Der französische Philosoph Henri Bergson kritisierte in seinem 1922 veröffentlichten Buch „Durée et Simultanéité“ Einsteins neue Raumzeit mit dem Selbstverständnis des Philosophen als letzte naturphilosophische Bewertungsinstanz. Er wies auf zeitliche Strukturen hin, die Einstein übersehen hätte. Doch die Physik hatte den Kampf um die Definitionsmacht der physikalischen Struktur der Raumzeit gewonnen, Bergson mußte mit dem Vorwurf leben, die Relativitätstheorie nicht hinreichend verstanden zu haben<sup>14</sup>.

Ernst Cassierer diskutierte den Konflikt um das Erkenntnisprimat zwischen Philosophie und Physik in seinem Aufsatz *Zur Einsteinschen Relativitätstheorie*. Er kommt dabei zu dem (diplomatischen) Schluß, daß keine symbolische Form vollständige Erkenntnis für sich beanspruchen könne: „Die Frage aber, welche von beiden Raum- und Zeitformen, die psychologische oder die physikalische, die Raum- und Zeitform des unmittelbaren Erlebens oder die des mittelbaren Begreifens und Erkennens, denn nun die *wahre* Wirklichkeit ausdrückt und in sich faßt, hat für uns im Grunde jeden bestimmten Sinn verloren.“<sup>15</sup> Eine „kritische Erkenntnistheorie“ (ibid. S.116) kann zwischen Physik und Bergsons Philosophie keine normative Entscheidung treffen, „beide Gesichtspunkte lassen sich im idealistischen Sinne und ihrer Notwendigkeit verstehen: - keiner reicht für sich aus, das tatsächliche Ganze des Seins im idealistischen Sinne, als ‚Sein für uns‘ zu umfassen.“ (ibid. S.118)

Die Relativitätstheorie traf einen Nerv der Zeit: „In der Tat wurde Einsteins relativistische Revision der klassischen Raum-Zeit Auffassung von vielen Menschen nach dem 1. Weltkrieg als Zusammenbruch einer alten Welt mit absoluten Maßstäben empfunden: ‚Alles ist relativ‘ war ein beliebtes Schlagwort in einer Epoche sich auflösender Wertvorstellungen und mag ideologisch für eine größere Akzeptanz der Einsteinschen Theorie bei den einen oder gesteigert Reserve und Ablehnung bei den anderen gesorgt haben.“<sup>16</sup>. Die Kernaussage der Relativitätstheorie wurde in verschiedene Diskurse übersetzt und eingegliedert, so gut es möglich war. Der Theologe H. Vortisch schrieb: „Naturgesetze sind uns nicht von Gott geoffenbart; sie

---

<sup>13</sup> Eine Einführung mit dem essentiellen Formalismus bietet Schmutzer *Relativitätstheorie aktuell*

<sup>14</sup> Eine Darstellung Bergsons inhaltlicher Fehler findet sich bei Sokal *eleganter Unsinn*

<sup>15</sup> Cassierer *Zur Einsteinschen Relativitätstheorie* S.117

<sup>16</sup> Mainzer *Philosophie und Physik der Raumzeit* S.45

haben keinen absoluten Wert, sondern sind der Relativität unterworfen, so gut wie die anderen irdischen Dinge.“<sup>17</sup>

Die spezielle Relativitätstheorie legte die Grundlage für immer abenteuerliche Vorstellungen über Entstehung und Beschaffenheit des Kosmos. In der allgemeinen Relativitätstheorie formulierte Einstein die Idee eines in der 4-dimensionalen Raumzeit gekrümmten Universums. Der Astronom Edwin Hubble schloß 1929 aus der Rotverschiebung beobachteter Sonnensysteme auf ein expandierendes Universum, das notwendigerweise auch einen Anfang hatte, den Urknall oder Big-Bang, wie ihn der Nuklearphysiker George Gamow 1946 bezeichnete. Wechselweise ging man von einem expandierenden, zyklisch kontrahierenden oder stabilen Universum aus. Die Berechnung seines Alters hängt von der angenommenen Expansionsgeschwindigkeit zusammen, der Hubble-Konstante  $H_0$ . Verschiedene Forscher nehmen z.Zt. Werte für  $H_0$  zwischen 50 und 80 an, wodurch der Big Bang auf 10 Mrd. bis 16 Mrd. Jahre zurückgeschätzt wird.

Die Raumzeit ist durchsetzt mit Gravitationssingularitäten, den Schwarzen Löchern. Aus der rechnerischen Lösung der Einsteinschen Feldgleichung der Gravitation zeigte Roger Penrose 1965, daß ein Stern, der unter der eigenen Masse kollabiert, zu einem Punkt mit unendlicher Dichte und unendlicher Krümmung der Raumzeit zusammenfällt. Raumzeitsingularitäten können untereinander durch Wurmlöcher verbunden sein, welche 1935 von Albert Einstein und Nathan Rosen vorgeschlagen wurden und als Einstein-Rosen-Brücken berechenbar sind. Sie sind als extrem instabil berechnet, doch sollen in ihnen auch Zeitreisen möglich sein. Ein weiteres Abenteuer der modernen Physik ist die seit Ende der 60er Jahren entwickelte String-Theorie. Sie geht von 7- bis 11-dimensionalen Grundbausteinen der Materie aus, deren Extradimensionen in der Größenordnung  $10^{-33}$  zusammengerollt sind<sup>18</sup>. Die Stringtheorie verspricht, die Relativitätstheorie mit der Quantenmechanik zu vereinen und die von der Physik wie die blaue Blume ersehnte Weltformel zu liefern, aus der alle Naturgesetze ableitbar sind.

Nur wenige Spezialisten verstehen und diskutieren die Theorien in ihrem mathematischen Kern, noch weniger können sie auch nur in Ansätzen überprüfen. Für alle übrigen bleibt die Kosmologie eine Glaubensfrage, in der sich das Vertrauen in die Wissenschaft und in ihre Vertreter niederschlägt. Würden sie morgen publizieren, daß das Universum in sich verknotet sei, müßten wir es ebenso glauben wie das Gegenteil.

---

<sup>17</sup> Vortisch *Die Relativitätstheorie* S.55

<sup>18</sup> Davies; Brown *Superstrings*

## **Bibliographie**

- Audretsch, J; Mainzer, K. (Hersg.) *Physik und Philosophie der Raum-Zeit* Mannheim, Wien, Zürich: BI 1994
- Bergson, H. *Durée et Simultanéité* Paris 1922.
- Cassirer, E. *Zur Einsteinschen Relativitätstheorie* in *Zur modernen Physik* Darmstadt 1957
- Davies, P.; Brown, J. *Superstrings* München: dtv 1992(1988)
- Dinzelbacher, P. *Europäische Mentalitätsgeschichte* Stuttgart: Kröner 1993
- Dijksterhuis, E.J. *Die Mechanisierung des Weltbildes* Berlin, Göttingen, Heidelberg: Springer 1956 (1950)
- Hawking, S. *Die illustrierte kurze Geschichte der Zeit* Reinbek: Rowohlt 2000 (1996, 1988)
- Kuhn, T. *Die Struktur wissenschaftlicher Revolution* Frankfurt/Main: Suhrkamp 1973 (1962)
- Minkowski, H. *Raum und Zeit* in *Physikalische Zeitschrift* 10 (1909) S.104
- Romanyshyn, R. *Technology as symptom and dream* London: Routledge 1989
- Salgado, R. *The Light Cone* Stand: 02.06.1997  
<http://physics.syr.edu/courses/modules/LIGHTCONE/index.html> (am 10.07.2000)
- Schmutzer, E. *Relativitätstheorie aktuell* Stuttgart: Teubner 1996
- Sokal, A.; Bricmont, J. *Eleganter Unsinn* H.U.Beck: 1999
- Vortisch, H. *Die Relativitätstheorie und ihre Beziehung zur christlichen Weltanschauung* Hamburg: Agentur des rauhen Hauses 1921
- Wertheim, M. *The pearly Gates of Cyberspace* London: Virago 1999