

ZEIT

Zur Entwicklung des Zeitverständnisses Eine historische Übersicht

WILLI KAFITZ*)

Abstract:

The understanding of time has changed radically over the centuries. For many centuries, a peasant society only required a restriction to the times of day and calendar. Systematic astronomical knowledge was reserved for an elite only. In the early modern era, beginning with Galileo, physics in particular had to include time as a parameter. But scientifically-oriented time measurement was only possible with more precise clocks. At the same time, for economic reasons, it became necessary to harmonize local times, then national times, to a universal time. Newton and Leibniz developed a completely different understanding. For Newton, time was absolute, everywhere equally fluid and independent of things. Leibniz, on the other hand, saw dependencies. He looked at time relative to what had happened. But this view did not prevail. This view was only taken up again with the relativity theory. There is no absolute time and therefore one cannot speak of simultaneity in the case of two spatially separated events. Time is relative. The connection between general relativity and quantum theory is still a big unsolved problem. However, the first theories have been worked out that aim to quantize gravity. The mathematical description of some theories results in a "graininess" of space and time on the smallest scales in the area of Planck length and Planck time. Units of space and time may no longer be divisible at will, but quantized. The concept of time as we know it no longer makes sense in those dimensions.

Keywords: Time measurement and time mentality, Galileo and time, world time, time courses and entropy, Newton's understanding of time, Leibniz's understanding of time, time in special and general relativity, time in quantum gravity theories

*) Dr. Willi Kafitz, Rother Weg 3, 35112 Fronhausen, email: willikafitz@web.de

Dieser Beitrag erscheint auch in gedruckter Form in der "Oberhessischen Naturwissenschaftlichen Zeitschrift", Volume 69, Gießen 2021

Zusammenfassung:

Das Zeitverständnis hat sich im Laufe der Jahrhunderte radikal geändert. Viele Jahrhunderte war in einer bäuerlichen Gesellschaft nur eine reine Naturbezogenheit auf Tageszeiten und Kalender erforderlich. Systematisches astronomisches Wissen war nur einer Elite vorbehalten. In der beginnenden Neuzeit, beginnend mit Galilei, musste besonders die Physik die Zeit als Parameter einbeziehen. Aber erst mit genaueren Uhren war eine wissenschaftlich orientierte Zeitmessung möglich. Gleichzeitig wurde es aus wirtschaftlichen Gründen nötig, die bis dahin bestehenden Ortszeiten, dann nationalen Zeiten, zu einer Weltzeit zu harmonisieren. Newton und Leibniz entwickelten ein vollkommen unterschiedliches Verständnis. Für Newton war die Zeit absolut, überall gleich fließend und unabhängig von den Dingen. Leibniz dagegen sah Abhängigkeiten. Er betrachtete die Zeit relativ zu den Geschehnissen. Doch diese Sicht setzte sich nicht durch. Erst mit der Relativitätstheorie wurde diese Sichtweise wieder aufgegriffen. Es gibt keine absolute Zeit und man kann deshalb bei zwei räumlich getrennten Ereignissen nicht von Gleichzeitigkeit sprechen. Zeit ist relativ zum Inertialsystem. Die Verbindung von Allgemeiner Relativitätstheorie und Quantentheorie ist noch ein großes ungelöstes Problem. Jedoch sind erste Theorien ausgearbeitet worden, die eine Quantisierung der Gravitation anstreben. Aus der mathematischen Beschreibung einiger Theorien ergibt sich scheinbar auf kleinsten Skalen im Bereich der Plancklänge und Planckzeit eine „Körnigkeit“ von Raum und Zeit. Raumeinheiten und Zeiteinheiten sind möglicherweise nicht mehr beliebig teilbar, sondern quantisiert. Der Zeitbegriff, wie wir ihn kennen, macht in diesen Größenordnungen keinen Sinn mehr.

Schlüsselwörter: Zeitmessung und Zeitmentalität, Zeit bei Galilei, Weltzeit, Zeitverläufe und Entropie, Zeitverständnis bei Newton, Zeitverständnis bei Leibniz, Zeit in der Speziellen und Allgemeinen Relativitätstheorie, Zeit in Quantengravitationstheorien

Zitate

Zeit ist, was verhindert, dass alles auf einmal passiert!
Time is what prevents everything from happening at once.

(oft *John Archibald Wheeler* zugeschrieben)¹

Was also ist die Zeit? Wenn niemand mich danach fragt, weiß ich's, will ich's aber einem Fragenden erklären, weiß ich's nicht. ... Die gegenwärtige aber, wenn sie immer gegenwärtig wäre und nicht in Vergangenheit überginge, wäre nicht mehr Zeit, sondern Ewigkeit.“

Augustinus von Hippo (354 bis 430)²

Es könnte scheinen, dass alle die Definition der Zeit betreffenden Schwierigkeiten dadurch überwunden werden können, dass ich an Stelle der „Zeit“ die „Stellung des kleinen Zeigers meiner Uhr“ setze.³

Albert Einstein

Die absolute, wahre und mathematische Zeit verfließt an sich und vermöge ihrer Natur gleichförmig und ohne Beziehung auf irgendeinen äußeren Gegenstand. Sie wird auch von mir mit dem Namen Dauer belegt.⁴

Isaac Newton

Jeder Fortschritt im naturwissenschaftlichen Verständnis der Welt ist gleichzeitig ein Bruch mit früherem Denken.⁵

Carlo Rovelli

Was ist die Zeit? Ein Geheimnis, - wesenlos und allmächtig⁶

Thomas Mann

¹ Eine Recherche von „Quote Investigator“ untersuchte unterschiedliche Quellen des Zitats: Siehe <https://quoteinvestigator.com/2019/07/06/time/>
Time is nature's way to keep everything from happening all at once.
Wheeler quoted this saying in *Complexity, Entropy, and the Physics of Information* (1990), p. 10

² zitiert nach link.springer.com

³ Albert Einstein, Zur Elektrodynamik bewegter Körper, *Annalen der Physik und Chemie*, Jg. 17, 1905, S. 893

⁴ Isaac Newton, 'Principia', 1. Scholium (1686)

⁵ Carlo Rovelli, Und wenn es die Zeit nicht gäbe? Rowohlt, 2020, S. 193

⁶ Der Zauberberg, 6. Kapitel

Inhalt

Einleitung und Fokus	62
Zeitverständnis, Zeitmessung und Zeitmentalität	63
Der Weg zur Weltzeit	76
Zeit in der Wissenschaft – Galileo Galilei	80
Zeitverläufe	83
Zeit und Raum bei Newton und Leibniz	87
Zeit und Raum bei Einstein	93
Zeit in Quantengravitationstheorien	108
Der Realitätsbegriff in künftigen Quantengravitationstheorien	126
Fazit	132
Literaturhinweise	133
Abbildungsverzeichnis	136
Danksagung	137

Einleitung und Fokus

Im Alltag und erst recht in der Technik- und Wissenschaftsgeschichte hat sich im Laufe der Jahrhunderte das Zeit- aber auch Raumverständnis grundlegend geändert. Philosophen im weitesten Sinne haben dabei das Zeitverständnis auch diversifiziert. Die aktuelle, konkrete Technik der Zeitmessung korrelierte nur langsam mit der Zeitmentalität in bäuerlichen oder handwerklich orientierten Gesellschaften. Das naturwissenschaftliche Denken begann durchaus in frühen Hochkulturen, wie in der Antike, mit rein rationalen, auf die Beobachtung bezogenen Argumenten. Aber in den stark landwirtschaftlich geprägten Gesellschaften und in den Städten mit dem sich entwickelnden Zunftwesen war zumindest im ersten Jahrtausend eine genaue Zeit nicht erforderlich. Die Zeit strukturierte zwar durchaus viele Tagesabläufe. Man dachte aber in größeren Zeiträumen – Minuten spielten keine Rolle. Der Kalender war eine wissenschaftliche Errungenschaft der Astronomie und hatte wirtschaftliche, religiöse Bedeutung und war sehr früh sogar Motor der Schrift- und Zahlzeichenentwicklung. Später sorgte die Kirchenglocke oder andere akustische Signale für einen geregelten Tagesablauf auf Land oder auf See. Im Spätmittelalter verbesserte sich die Zeitmessung, wurde zunächst mit Turmuhren wetterunabhängig und die Uhrzeit wurde für alle sichtbar oder hörbar. Damit änderte sich auch die Zeitmentalität. Mit Beginn der Neuzeit und der Erforschung von physikalischen Gesetzen durch Experimente und ihrer mathematischen Beschreibung (z.B. durch Galileo Galilei) musste die Zeit als Parameter berücksichtigt werden. Genauere Uhren haben dabei in der Folge den gesellschaftlichen Wandel und wissenschaftlichen Fortschritt massiv unterstützt. In der immer stärker überregional verflochtenen Wirtschaft stieg die Mobilität extrem stark an und die Uhrzeit bestimmte immer mehr den Tagesablauf. Zu diesem Zeitpunkt war eine Standardisierung der Zeit erforderlich. Ortszeiten wurden überregional und dann national harmonisiert. Schließlich wurde eine Weltzeit mit 24 Zeitzonen etabliert, wie wir sie heute kennen.

Der wissenschaftliche Fortschritt im Zeitverständnis wurde besonders durch Newton, aber auch durch Leibniz und viele andere vorangetrieben. Allerdings entwickelten sie eine unterschiedliche Zeitphilosophie. Bis zum Ende des 19. Jahrhunderts wurden neue philosophische und naturwissenschaftliche Ideen entwickelt, die Albert Einstein aufgriff und die Spezielle Relativitätstheorie in Inertialsystemen mit ruhenden oder gleichförmig sich relativ zueinander bewegend Körpern ohne Krafteinwirkung formulierte. Zehn Jahre später veröffentlichte er die Allgemeine Relativitätstheorie für beschleunigte Körper. Dabei konnte durch Gleichsetzung von träger und schwerer Masse die Gravitation einbezogen werden. Damit war die absolute Zeit von Newton durch eine relative ersetzt worden.

Anfang des 20. Jahrhunderts eroberte die Quantentheorie die physikalische Welt. Ihr Zeitverständnis ist jedoch zuerst eher klassisch geprägt. Beide wesentlichen Theorien des 20. Jahrhunderts zu harmonisieren, ist nach wie vor eine große Herausforderung. Beim Versuch der Quantisierung der Gravitation sind einige Theorien entstanden, von denen aber noch keine experimentell überprüft werden konnte. Die Stringtheorie hat dabei alle Grundkräfte im Fokus; bei den reinen Quantengravitationstheorien gibt es interessante Kandidaten. In beiden Theoriegruppen konnten zumindest im Ansatz unendliche Werte vermieden werden. Diese sind ein Zeichen, dass eine Theorie noch nicht vollständig ist. Dies gilt für die Allgemeine Relativitätstheorie, z.B. bei der mathematischen Beschreibung von Schwarzen Löchern. In den kleinen Skalen muss Zeit und Raum aber anders „gedacht“ werden. Beide sind quantisiert, aber insbesondere ist die Frage offen, ob Zeit und Raum diskret sind oder kontinuierlich. Viel spricht für eine diskrete Struktur. Doch Zeit, Raum und damit Realität bedürfen sicherlich einer Neuinterpretation.

Zeitverständnis, Zeitmessung und Zeitmentalität

Zeitverständnis

Zeitphilosophische und theologische Ansichten⁷ prägen immer noch wesentliche Teile der Weltbevölkerung. Für manche Kulturen und Religionen ist der Gang der Zeit und damit der Ereignisse determiniert. Dies gilt besonders für den Islam („Kismet“); andererseits unterliegt gerade im Islam prinzipiell Alles einer göttlichen Einflussnahme. Bis auf den Beginn der Zeit oder wissenschaftlich nicht erklärbarer Wunder hat sich das Christentum weitgehend davon gelöst. Hinduismus oder Buddhismus gliedern das Zeitgeschehen in sehr große Weltalter von Werden und Vergehen. Ähnliches gilt für den Taoismus als Religion und darüber hinaus im Konfuzianismus als gesellschaftliche Norm. Dagegen gibt es in der jüdisch-christlichen Tradition eine lineare Entwicklung zwischen der Schöpfung und dem Weltende. Nur in der chinesischen Kultur hat die Zeit eine weitgehend objektive Realität.

Geschichtlich betrachtet hat sich das Zeitverständnis einerseits historisch und andererseits weltanschaulich differenziert und weiterentwickelt.

Anaximander von Milet (um 610 - nach 547 v. Chr.), Lehrer von Pythagoras, verzichtete erstmals vollkommen auf Erklärungen durch göttlichen Einfluss. Er war der erste Astronom, der Himmelbewegungen rational studierte und sie in einem geometrischen Modell als ein planvoll geordnetes Ganzes versuchte

⁷ Siehe u.a. Hans Lenz, Universalgeschichte der Zeit, marixverlag, Wiesbaden, 2005, S. 14 f

wiederzugeben. Anaximander kann man als Urvater des westlichen Wissenschaftsansatzes betrachten.

Erheblichen Einfluss auf zwei Jahrtausende abendländischen Ansichten hatte Aristoteles (384-322 v. Chr.). Er formulierte eine Theorie der vier Bewegungen Entstehen – Vergehen – Zunehmen - Schwinden und propagierte eine kontinuierliche, beliebig teilbare Zeit. Durch seine Empirie wurde oft die Sicht auf eine mathematisch beschreibbare Realität versperrt. Zekl schreibt jedoch: *Die Abhandlung über die Zeit ... gehört in ihrer Geschlossenheit, Zielstrebigkeit und Reichhaltigkeit zum Besten, ... was die ganze antike Philosophie hierüber zu sagen hat.*⁸

Demokrit (459 oder 460-370 v.Chr.) dagegen sah eine diskrete, diskontinuierliche Natur von Masse, Raum und Zeit. Dieser Ansicht war auch z.B. Galileo Galilei, Giordano Bruno, Francis Bacon oder David Hume.

Ein wichtiger christlicher Theologe und Denker war Augustinus von Hippo (345-430). Die Welt sei nicht mit, sondern in der Zeit geschaffen. Augustinus unterteilt erstmals Zeit in Zukunft, Gegenwart und Vergangenheit. Gegenwart war bei Aristoteles nicht Teil der Zeit. Erinnerung und Erwartung sind in der Gegenwart die Gegenstücke von Zukunft und Vergangenheit.

Thomas von Aquin (1224-1274) betrachtete die Philosophie als „Magd der Theologie“. Damals umfasste der Begriff auch die Naturphilosophie. Aber ständige Einflussnahme durch Gott hat er nicht gesehen.

Erst Nikolaus Kopernikus (1473-1543) hat die Naturwissenschaft von der Scholastik befreit und den ersten Schritt zur Objektivierung der Zeit getan.

Den nächsten Schritt machte Johannes Kepler (1571-1630). Er betrachtete das heliozentrische Weltbild als eine physikalische Tatsache und nicht nur als mathematisches Modell.

Auf Galileo Galilei (1564-1642), Gottfried Wilhelm Leibniz (1646-1716) und auf Isaac Newton (1642-1726 nach julianischem Kalender) soll noch näher eingegangen werden.

Immanuel Kant (1724-1804) betrachtete Zeit als Ordnungsbeziehung und sie war nach seiner Auffassung ebenfalls eine kontinuierliche Zeit. Nach Kant kann menschliche Erkenntnis die Grenzen der Erfahrung nicht überschreiten.

Georg Wilhelm Friedrich Hegel (1770-1831) versuchte die Trennung der Zeit und des Raumes von der Materie zu überwinden.

Auch materialistische Philosophen, wie Marx, Engels oder Lenin beschäftigten sich mit dem Phänomen Zeit, betrachteten sie als relational und fühlten sich z.B. durch die Relativitätstheorie bestätigt.

⁸ Zitat H.G. Zekl, Einleitung zur Physik des Aristoteles, [3], S. XLIII, Aristoteles' Physik; Bücher I-IV; Felix Meiner Verlag, 1987; Übersetzt von Hans Günter Zekl

Naturwissenschaftlich/mathematisch gesehen markiert auch Jean Baptiste Joseph Fourier (1768-1830) einen Wendepunkt im wissenschaftlichen Zeitverständnis. Er stellt Geschwindigkeit, Beschleunigung etc. erstmals durch die Dimensionen Masse, Zeit und Länge dar. Zeit und Raum sind damit nicht trennbar und Eigenschaft des Universums.⁹

Weitere, der vielen Philosophen, die sich mit der „Zeit“ beschäftigt haben, sind z.B. Edmund Husserl, Sören Kierkegaard, Martin Heidegger, Jean-Paul Sartre oder Ernst Jünger. Auf den Logiker und Mathematiker Kurt Gödel (1906-1968) wird noch einzugehen sein.

Zeitmessung, metrische Zeit

Die Geschichte der Zeitmessung ist lang. Es gab Wasseruhren (griechisch Klepsydrēn), Kerzenuhren, „genormte“ Räucherstäbchen in China und Tibet (time sticks) und natürlich immer die Sonnenuhr, z.B. als Schattenstab oder in Ägypten durch Obelisken.¹⁰ Es sind Uhren ohne Taktgeber. Problematisch bei der Sonnenuhr ist dabei die Ausrichtung auf die Himmelsachse. Mechanische Uhren mit Spindelhemmung entstanden im Mittelalter um 1300. Doch erst die Pendeluhr brachte einen enormen Genauigkeitssprung. Aber in früheren Epochen nahmen die Menschen die Zeit nur in größeren Einheiten wahr. Minuten spielten in bäuerlich-handwerklichen Gesellschaften in allen Kulturkreisen kaum eine Rolle. Zeit war besonders auf dem Land stark mit den naturgegebenen Zyklen verknüpft, Tag und Nacht im Rhythmus der Jahreszeiten. Auch der Begriff „Tagwerk“ war ursprünglich eine Zeitangabe, was an einem Tag geleistet werden konnte. Die vorindustrielle Arbeit ist somit aufgabenorientiert und weniger orientiert an der Uhrzeit. Auch heute finden sich in anderen Kulturen Zeitangaben wie „... die man braucht, um Reis zu kochen“ (ca. 15 min). Eine Differenzierung beim praktischen Zeitverständnis fand erst mit den industriellen Anfängen in England und den Manufakturen, z.B. in Flandern, statt und führte nach und nach zum westlichen Umgang mit Zeit und Uhrzeit. Protestantismus und verstärkt der Calvinismus, sowie Puritaner entwickelten daraus eine Doktrin. Max Weber konstatiert bei ihnen: „Zeitvergeudung ist also die erste und prinzipiell schwerste aller Sünden.“¹¹

Dabei kann man schon in vorindustriellen Zeiten der Bevölkerung eine Orientierung an festgelegten Zeiten nicht absprechen. Entfernungen wurden in Wegstunden angegeben. Es gab definierte Marktzeiten, Sperrstunde in der Gastronomie, feste Zeiten, in denen Stadttore geschlossen wurden, weltliche

⁹ Hans Lenz, ebenda, S. 25

¹⁰ https://de.wikipedia.org/wiki/Geschichte_der_Zeitmessgeräte
<https://www.ptb.de/cms/ptb/fachabteilungen/abt4/fb-44/fragenzurzeit.html>

¹¹ Max Weber, Askese und kapitalistischer Geist, in: Gesammelte Aufsätze zur Religionssoziologie, Bd. I, Die Protestantische Ethik und der Geist des Kapitalismus, 6. Auflage, Tübingen 1872, S. 166 ff, zitiert S. 26 nach <https://www.econstor.eu/bitstream/10419/58204/1/716186314.pdf>

Feste und religiöse Feiertage. „Urlaubszeit“ war unbekannt. In adligen Kreisen wurde aber die oft mehrjährige Bildungsreise gepflegt. Man nahm sich die „Zeit“. Auch die Zeit der Wanderschaft (Walz) bei Handwerksgesellen war ein fester Abschnitt in der Lebenszeit. Sie erfolgte nach der „Freisprechung“ (Lehrende), war Voraussetzung für die Meisterprüfung und diente gewissermaßen der Weiterbildung in regional unterschiedlichen Techniken.

Unterschiede in den „Temponormen“ sind jedoch nicht nur historisch, sondern bis heute auch kulturell zu sehen. Levine schreibt: *„Das Grundwertesystem einer Kultur spiegelt sich auch in ihren Temponormen. Die wahrscheinlich größten kulturellen Unterschiede betreffen den Antagonismus von Individualismus und Kollektivismus, die Frage, ob eine Kultur sich grundsätzlich am Individuum und der Kernfamilie oder an einem größeren Kollektiv orientiert.“*¹²

Die Wissenschaft kannte allerdings in einigen Kulturkreisen die genauere Einteilung der Uhrzeit bis zu Sekunden schon.



Abb. 1: Sonnenuhr im Observatorium des Jai Singh von Jaipur (Indien)

So wurden in den indischen Städten Delhi und Jaipur vor knapp 300 Jahren Observatorien vom Maharadscha Jai Singh gebaut, die die Uhrzeit auf zwei Sekunden genau messen konnten.¹³ Doch erste astronomische und mathematische Erkenntnisse gehen bis in das erste Jahrtausend v. Chr. in Indien zurück. Die Bezeichnungen Minute und Sekunde haben ihren Ursprung im babylonischen Sexagesimalsystem. Darin wurden Brüche als 60stel und 3600stel dargestellt. Die 60stel wurden später lateinisch pars minuta (‚verminderter Teil‘) bezeichnet, die 3600stel (ein 60stel eines 60stels) als pars minuta secunda (‚zweiter verminderter Teil‘), woraus die Sekunde wurde.¹⁴ Minuten oder gar Sekunden wurden bis weit in das 18. Jahrhundert im Alltag nicht benötigt. Nur in speziellen Bereichen, wie in der Medizin beim Messen des Pulses, waren Sanduhren mit

einer ca. 15 Sekunden Eichung im Gebrauch. Sand wurde allerdings kaum als Füllung verwendet. Seit dem Spätmittelalter wurden neben Marmorstaub und Zinn- oder Bleisand, auch feingemahlene Eierschalen verfüllt. Das

¹² Robert Levine, Eine Landkarte der Zeit, PiperMünchen/Zürich, ungekürzte Taschenbuchausgabe, Oktober 1999, S. 48

¹³ <https://www.wissen.de/indien-mal-anders-die-himmelsobservatorien-von-jaipur>, Quelle der Abbildung 1: Eigenes Foto.

¹⁴ Wörtlich aus de.wikipedia.org › wiki › Minute

Zeitverständnis beim überwiegenden Teil der Bevölkerung entsprach allerdings profanen Alltagsbedürfnissen. Dabei war ein Unterschied in der Zeitmentalität zwischen Stadt und Land zu verzeichnen.¹⁵ Neben anderen Zeitmessgeräten sind seit der Antike vorwiegend Sonnenuhren in Gebrauch und der Begriff „Uhr“ war bis ins beginnende 19. Jahrhundert mit ihnen eng verbunden.¹⁶

Vor allem in der Seefahrt wurde die Zeitmessung stark ritualisiert. Gleiches gilt für das Klosterleben, wo nach dem Grundsatz „ora et labora – bete und arbeite“, der Tag strukturiert wurde. In der Regel hieß das bei den meisten Orden acht Stunden arbeiten und acht Stunden beten. Weil das Gebet keine körperliche Anstrengung war, war es auch gleichzeitig Erholungspause von der Arbeit. Stundengebete wurden unterteilt in Horen, also selbständige Abschnitte.¹⁷

Es gab (und gibt es in moderner Form) auf Schiffen das sogenannte „Glasen“. Der Name kommt von Stundengläsern, also gläsernen Sanduhren, die auf eine halbe Stunde geeicht waren. Es wurde eine Glocke so oft geschlagen, wie das Stundenglas pro vier-Stunden-Wache umgedreht wurde, also bis zu acht Mal. In der Regel gab es in 24 Stunden sechs Wachen á vier Stunden beginnend ab 4:00 Uhr morgens. Dann beginnt die erste Morgenwache und endet die zweite Nachtwache („Hundswache“).¹⁸

Nur bei Hofe tauchten schon früh „Zeitmaschinen“ auf – oft durch Kontakte zum Orient. Sie waren mehr Attraktionen als Messinstrumente. So wird in der „Vita Karoli Magni“ (vermutlich „Vita Karoli imperatoris“) von dem fränkischen Gelehrten Einhard im 9. Jahrhundert berichtet, dass Kaiser Karl der Große im Jahr 807 vom Kalifen Harun al-Raschid eine kunstvolle Wasseruhr geschenkt bekommen hat¹⁹. Die Wasseruhr war schon den Römern geläufig. Der Begriff „aquam dare“ konnte z.B. einem Rechtsanwalt vor Gericht mehr Zeit einräumen; der Begriff „aquam perdere“ (Wasser verlieren) stand für Zeitverschwendung. Bei weitschweifigen Rednern im Senat wurde gefordert, ihnen „das Wasser zu

¹⁵ Erhard Chvojka: Wie die Zeit der Uhr zu einem Symbol „guter Moral“ und „hoher Zivilisation“ wurde, in: Müller-Funk, Wolfgang (Hrsg.): Zeit. Mythos, Phantom, Realität. Katalog zur Oberösterreichischen Landesausstellung Wels 2000, Wien 2000, S. 183-195.

Erhard Chvojka: Zeit der Städter, Zeit der Bauern. Ein Fallbeispiel für die gegenseitige Wahrnehmung der Zeitordnungen und Zeitmentalitäten von Städtern und Landbewohnern im Wien des frühen 18. Jahrhunderts, in: Chvojka, Erhard/Schwarcz, Andreas/Thien, Klaus (Hrsg.): Zeit und Geschichte. Kulturgeschichtliche Perspektiven [Veröffentlichungen des Instituts für Österreichische Geschichtsforschung 36], Wien, München 2002, S. 192-202

¹⁶ <https://de.wikipedia.org/wiki/Sonnenuhr>,

<https://wissenstexte.de/physik/sonnenuhr.htm>

¹⁷ Näheres siehe z.B. [https://de.wikipedia.org/wiki/Klosteralltag_\(Zisterzienser\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Klosteralltag_(Zisterzienser))

¹⁸ Die 6. Wache heißt auch Rattenwache und ist aus B. Travens Roman „Totenschiff“ bekannt.

¹⁹ Siehe https://de.wikipedia.org/wiki/Vita_Karoli_Magni und

<https://www.spiegel.de/spiegelgeschichte/die-entdeckung-der-zeit-a-1015939.html>

entziehen.“²⁰ Erst im 14. Jahrhundert kamen die ersten mechanischen Uhren in größerem Maß zum Einsatz. Ursprünglich hatten sie keine Zeiger, waren also Zeitmesser, aber keine Uhren, sondern setzten Glocken in Bewegung. Das mittelenglische *clock* stammt vom mittelhochdeutschen *clocke* ab, aus dem „Glocke“ wurde.²¹ Später waren sogar hölzerne Uhren in Gebrauch. Der Handwerker bzw. Verkäufer hieß Kässtecher.²² In den Städten wurden seit dem

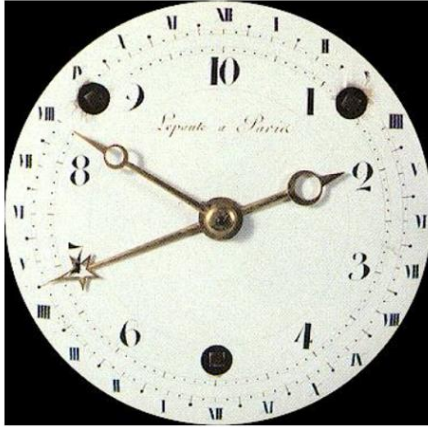


Abb. 2: „Revolutionsuhr“ im metrischen System.

14. Jahrhundert zunehmend Turmuhren installiert. Sie besaßen Zahnräder und Hemmung. Sie hatten nur eine relativ kurze Laufzeit von acht bis zwölf Stunden und es musste deshalb ein Uhrmacher benannt werden, der sie wieder aufzog. Wohlhabende Städte statteten die Uhren an öffentlichen Gebäuden mit mechanischen Zusatzfunktionen, wie sich bewegende Figuren oder astronomische Angaben, aus.²³ Auch die „Wohnzimmeruhr“ fand immer mehr Einzug in die Haushalte. Ab dem Jahr 1700 etwa wurde es üblich, Jungen bei Kommunion oder Konfirmation Uhren zu schenken. Erst im

20. Jahrhundert wurden auch Mädchen beschenkt.²⁴ Doch erst in der beginnenden Neuzeit wurden genauere Methoden der Zeitmessung wichtig. Sie betrafen zunächst die Wissenschaft, aber besonders die Seefahrt, wo zur Bestimmung des Längengrades präzise Uhren benötigt wurden. Das englische Parlament hatte 1714 bis zu 20.000 Pfund Preisgeld für die Lösung des Problems durch Konstruktion einer sehr präzisen Uhr ausgesetzt. Noch heute nennt man genaue, ortsveränderliche Uhren „Chronometer“. Sie haben als Konstruktionsmerkmal in der Regel ein Unruh-Spirale-Schwingsystem in Verbindung mit einer Chronometerhemmung. Der Begriff kommt von griechisch *chrónos*, Zeit, und findet sich ebenfalls in Wörtern wie Chronik oder auch synchron. Bisher war durch Sternbeobachtung die exakte Zeit festgestellt worden. Eine große Rolle spielten die sichtbaren vier Jupitermonde, die 1610 von Galileo Galilei entdeckt wurden. Er schlägt den Namen *Sidera Medicea* – die „Mediceischen Gestirne“ zu Ehren des florentinischen Adelshauses vor. Es sind die Jupitermonde Io, Europa, Ganymed und Kallisto. Sie können als eine

²⁰ Robert Levine, Eine Landkarte der Zeit, S. 93

²¹ Robert Levine, Eine Landkarte der Zeit, S. 93

²² <https://www.habsburger.net/de/medien/georg-opitz-ein-kasstecher-ein-holzerner-uhren-verkaefer-und-ein-aschensammler-wien?language=en>

²³ Beispiel Prager Rathausuhr, https://de.wikipedia.org/wiki/Prager_Rathausuhr
https://physik.cosmos-indirekt.de/Physik-Schule/Prager_Rathausuhr

²⁴ <https://www.habsburger.net/de/kapitel/puenktliche-staedter-zeitlose-bauern-geruhsame-frauen-oder-warum-die-uhrzeit-nicht-allen>

astronomische Uhr aufgefasst werden, weil sie von jedem Punkt auf der Erde gesehen werden können.

Allerdings ist dabei der wechselnde Abstand zwischen Erde und Jupiter mit einzubeziehen, da das reflektierte Licht deshalb unterschiedlich lange benötigt. Mit Hilfe von Tabellen machte man es den Navigatoren einfacher, den Längengrad zu bestimmen, indem sie die Eklipsen der Monde beobachteten. Es war zweifellos eine Revolution in der Navigation. Doch auf See waren die astronomischen Beobachtungen auf schwankenden Schiffen nur schwer zu bewerkstelligen.²⁵ Eine Kuriosität ist die Tatsache, dass man insbesondere nach der französischen Revolution versuchte, das metrische System auch auf die Zeitmessung auszudehnen.²⁶ Dies hat sich jedoch nicht durchgesetzt.

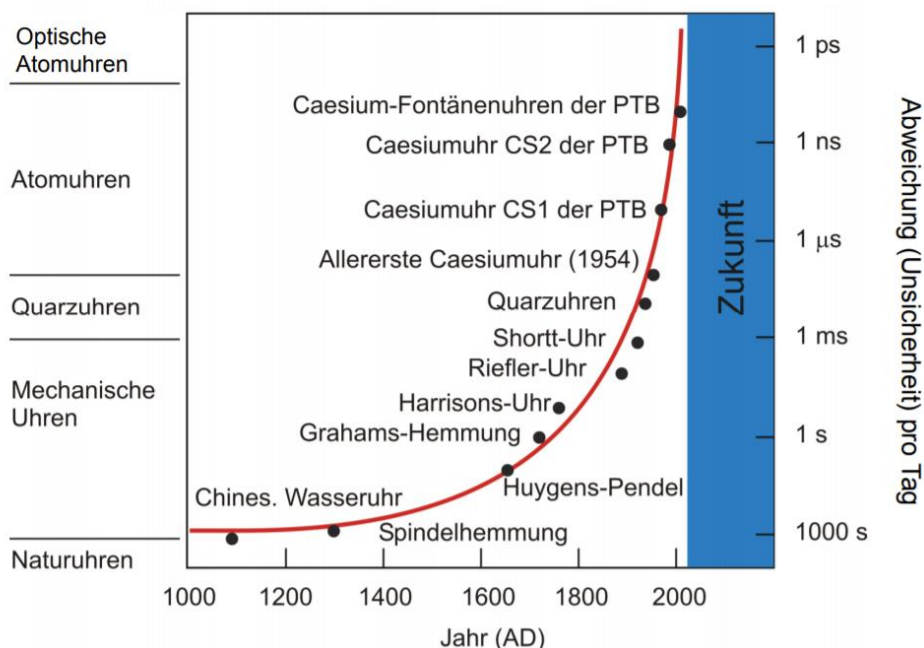


Abb. 3: Entwicklung der Genauigkeit von Uhren²⁷

(Abdruck mit freundlicher Genehmigung der PTB, Dr. Andreas Bauch)

²⁵ Dazu soll auf das Buch von Dava Sobel, Längengrad, Berlin Verlag, 1999, verwiesen werden. Es schildert anhand des schottischen Uhrmachers John Harrison die militärisch und wirtschaftlich bedeutende Problematik der Längengradbestimmung auf langen Seereisen. Harrison konzentrierte sich deshalb früh auf den Uhrenbau. Ihm wurden trotz wichtiger Erfolge nach 40 Jahren verbissener Arbeit nur ein Teil der Summe zugebilligt. Erst sehr spät, drei Jahre vor seinem Tod, wurde ihm erst nach massiver Intervention des Königs weniger als die Hälfte des Preisgeldes zugebilligt. Aber er kann als Pionier für bedeutende Erfindungen und technische Neuerungen für den Bau von Präzisionsuhren mit wichtigen Komponenten, wie Unruh, Temperaturbeständigkeit und Unempfindlichkeit gegen Feuchtigkeit und Bewegungen, gelten.

²⁶ Quelle der Abbildung 2: <https://watch-wiki.org/index.php?title=Datei:Revolutionsuhr.jpg>

²⁷ Quelle der Grafik 3: <https://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/fachabteilungen/>

Heute nutzt man Quarzuhren mit einem elektronischen Quarzoszillator als Taktgeber, die mit einer Frequenz von 10^6 Hz schwingen (Megahertz). Sie sind bis auf 10^{-6} bis 10^{-9} Sekunden pro Tag genau.

Erste Atomuhren sind sogar schon im Internet frei verkäuflich. Sie nutzen als Taktgeber Mikrowellenstrahlungsübergänge im Gigahertzbereich (10^9 Hz). Ihre relative Abweichung beträgt weniger als ca. 10^{-15} Sekunden pro Tag gegenüber der Standardzeit, die von der Physikalisch-technischen Bundesanstalt (PTB) bereitgestellt wird. Die neueste Entwicklung sind optische Atomuhren, die als Taktgeber Strahlungsübergänge im Petahertzbereich (10^{15} Hz, Röntgenstrahlung) nutzen. Es wurde damit eine relative Abweichung von kleiner 10^{-17} erreicht. Eine neue Dimension erreicht man nicht durch Schwingungen der Elektronen z.B. im Caesium, sondern durch niederenergetische Anregung des Atomkerns von Thorium (^{229m}Th).²⁸

Genauere Uhren braucht man heute u.a. für die Frequenzsynchronisation des Stromnetzes, für die Signalfrequenz im Mobilfunk, für die Satellitennavigation, für hochauflösende Radioteleskope oder in der Grundlagenforschung, z.B. Überprüfung der Naturgesetze auf Konstanz der Naturkonstanten. Wissenschaftlich relevant sind auch „Langzeituhren“, wie die Radiokarbon-Methode, die auf dem bekannten Zerfall (Halbwertszeit) des radioaktiven Kohlenstoffisotops $^{14}_6\text{C}$ beruht. $^{14}_6\text{C}$ wird durch kosmischen Neutronenbeschuss von $^{14}_7\text{N}$ in der oberen Atmosphäre gebildet und in lebende Organismen, wie Tiere oder Pflanzen während ihres Lebens, eingelagert. Es zerfällt anschließend gemäß dem Zerfallsgesetz und dient in einem gewissen Zeitrahmen als Datierungsmethode

Kalender

Neben dem Tag ist das Jahr die wichtigste periodische Umweltveränderung der belebten Natur. Die Länge eines Jahres konnte wahrscheinlich schon vor 20.000 Jahren in Tagen gezählt werden. Sie wurde früh als Umlauf der Sonne um die Erde (geozentrisches Weltbild) oder, nach Kopernikus, als Umlauf der Erde um die Sonne (heliozentrisches Weltbild) interpretiert. Kalender bilden ein Ordnungsprinzip für das Jahr. Sie haben Auswirkungen auf das Zeitverständnis, haben die Entwicklung von Schrift- und Zahlzeichen beeinflusst und bestimmen bis in die heutige Zeit unseren Alltag. Beobachtung der Himmelskörper, Sonne, Mond und die Planeten („Wandelsterne“) zeichnete bereits frühe Hochkulturen aus und definierte sie geradezu. Man konnte es aber zunächst nicht als Naturwissenschaft bezeichnen und das Wissen wurde von einer Priesterkaste beherrscht. Auch Formalisierung und Mathematisierung diente dem höheren Zweck und begründete wichtige Aspekte der Schriftentwicklung. So wurde ein

sexagesimales System bereits zum ersten Mal vor fast 4000 Jahren in Mesopotamien und Ägypten und später in Mittelamerika entwickelt. Man vermutet, dass sogar Jäger- und Sammlerkulturen während der letzten Eiszeit Stöcke und Knochen verwendeten, die den Phasenlängen des Mondes oder der Jahreszeiten entsprachen.²⁹ Stonehenge³⁰ ist ein Beispiel für prähistorische Steinkreise, die zur Vorhersage von Tagundnachtgleiche oder Sonnenwende benutzt wurden. Völlig eigenständig entwickelten sich um 800 v.Chr. in Mittelamerika Schrift- und Zahlzeichen in Verbindung mit einem vigesimal (auf Basis 20) strukturierten Kalender. Auch Maya und Azteken entwickelten Zeremonialkalender in enger Verbindung mit Schrift- und Zahlzeichenentwicklung.³¹ In Ägypten war das Nilhochwasser von entscheidender Bedeutung im Jahresablauf; seine Höhe beeinflusste sogar die jährlichen Steuern. In Europa strukturierten Kalender das Jahr, später insbesondere das Kirchenjahr. Sie waren wichtige Hilfestellungen vor allem der Agrargesellschaft. Oft gaben Namenstage im Kalender Impulse, z.B. für jahreszeitlich strukturierte landwirtschaftliche Tätigkeiten. Es war schon sehr früh gerade über Himmelsbeobachtungen die Länge eines astronomischen Sonnenjahres, also ein Umlauf der Erde um die Sonne, bekannt. Die Monatsaufteilung wurde jedoch maßgeblich von den Tierkreiszeichen bestimmt und spielt in der Astrologie in vielen Ländern heute eine kaum zu unterschätzende Bedeutung auch im Alltagsleben. Man muss streng zwischen Tierkreis-Sternbildern (engl. constellation) und Tierkreiszeichen (engl. signe) unterscheiden. Dabei lassen die Astrologen unberücksichtigt, dass sich die Gestalten und Positionen der Tierkreiszeichen seit ihrer Einführung vor ca. 6.000 Jahren durch die Babylonier vollkommen geändert haben (s.u.). Der Tierkreis ist die in 30°-Abschnitte unterteilte scheinbare Sonnenbahn mit ihren jeweiligen charakteristischen Sternbildern. Die weltweiten Namen bis auf sprachliche Eigenheiten gehen auf Claudius Ptolomäus in seinem Monumentalwerk „Megale Syntaxis“ (Große Zusammenfassung)³² zurück, das die Araber unter dem Namen „Almagest“ übernommen haben. Die Erde ist ein Kreisel, dessen Rotationsachse „präzisiert“, also einen gedachten Kreis in 25.780 Jahren vollzieht. Dadurch verschiebt sich z.B. der Frühlingspunkt um 50 Winkelsekunden ostwärts und die Tagundnachtgleiche ist jedes Jahr bzgl. der Fixsterne um 50 Sekunden früher. Alle 2.148 Jahre beträgt dies genau 30° und tritt damit in ein neues Sternbild. Schon Hipparchos von Nicäa (190-120 v. Chr.) erkannte das Problem und ermittelte einen plausiblen Wert. Die Präzession wird durch andere Phänomene etwas überlagert, so dass exakte Berechnungen

²⁹ siehe ebenso https://de.wikipedia.org/wiki/Geschichte_der_Zeitmessgeräte

³⁰ <https://de.wikipedia.org/wiki/Stonehenge>

³¹ Hans Lenz, Universalgeschichte der Zeit, marixverlag, Wiesbaden 2005, S. 43

³² Lucio Russo, Die vergessene Revolution, dt. Ausgabe Springer 2003, S. 91: Hier wird es Syntaxis mathematica (Mathematische Abhandlung) genannt.

schwierig sind.³³ Das Pendant zum Tierkreis bei der Sonnenbahn sind die Mondstationen, denn die Mondbahn durchläuft ebenfalls jeweils gleiche Sternbilder. Sie sind besonders für Lunarkalender, wie in der arabischen Welt, relevant. Sie heißen dort menazil, in Indien nakshatra und in China siu, wo sie für das Wahrsagen eine Bedeutung tief in die Lebenswirklichkeit hinein haben. Die Astronomen haben sich heute auf 88 Sternbilder geeinigt.³⁴ Für das Sonnenjahr muss man eine mittlere Länge annehmen, da sich die Zeit für einen Umlauf geringfügig verändern kann. Dies machte eine koordinierte Weltzeit nötig, die in der genannten Zahl nicht berücksichtigt ist. Diese mittlere Länge, die den gregorianischen Kalender bestimmt, beträgt: 365,2425 Tage = 365 Tage, 5 Stunden, 49 Minuten, 12 Sekunden. Da die Erdachse zur Ekliptik zurzeit einen Winkel von $66,56348^\circ$ bildet, steht die Sonne nur zweimal im Jahr senkrecht über dem Äquator. Die Zeitpunkte der größten Deklination von 23°

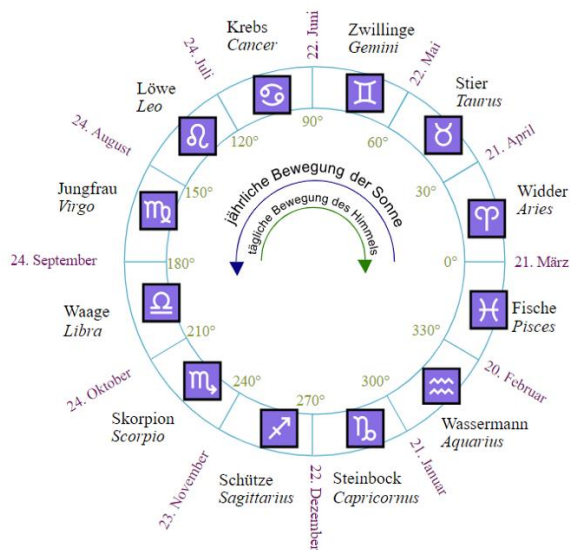


Abb. 4: Tierkreis unterteilt durch Tierkreiszeichen.

$26' 45''$ werden Solstitium (Sonnenstillstandspunkte) genannt und sind auf der Nordhalbkugel der 21. Juni und der 21. Dezember. Tagundnachtgleiche fallen auf den 19., 20. oder 21. März (Frühlingsäquinoktium) und auf den 22., 23. oder 24. September (Herbstäquinoktium). Sie markieren erst den kalendarischen Anfang der astronomisch definierten Jahreszeiten Frühling beziehungsweise Herbst. Im Jahr 2021 sind die exakten Zeitpunkte der wahren Äquinoktien am 20. März, 10:37 MEZ und am 22. September, 21:21 MESZ. Im Gegensatz zu den Solstitien sind die Daten wegen der elliptischen Erdbahn leicht flexibel

und die Jahreszeiten formal unterschiedlich lang (Frühling, Sommer 93 Tage, Herbst 91 und Winter 88 Tage). Alle Zahlen beziehen sich auf „überschaubare Zeiträume“. Der „mittlere Sonnentag“ hat sich geändert. Pro Jahrhundert wird ein Tag um 0,0021 Sekunden länger. Untersuchungen an Korallenfossilien legen nahe, dass ein Jahr vor 400 Millionen Jahren ca. 400 Tage lang war.³⁵ Eigentlich ist auch der Jahresbeginn astronomisch präzise definiert, aber über die Jahrtausende gab es keinen Kalender, der dies berücksichtigt hat. Die

³³ Hans Lenz, ebenda, S. 65 f

³⁴ Hans Lenz, ebenda, S.62 f

³⁵ Weitere Einzelheiten siehe Filk, Thomas; Giulini, Domenico; Am Anfang war die Ewigkeit, C.H.Beck, München, 2004, S. 36 f

Jahreszeiten erzeugen im Wechsel unterschiedliche Wetterphänomene und gaben deshalb schon früh Anlass zur Systematisierung durch Kalender.³⁶

Astronomen unterscheiden mehrere Jahresbezeichnungen, wie das siderische Jahr (Sternjahr, oft ab erstem Erscheinen des Sirius), das tropische Jahr zwischen zwei Tagundnachtgleichen (griech. tropai=Kehre) oder das anomalistische Jahr als Zeitspanne zwischen zwei sonnennächsten Punkten. Die Unterscheidung ist sinnvoll, weil sich ihre Längen nicht-periodisch unterscheiden.

Die Einteilung des Tags in 24 Stunden, heute gerechnet ab Mitternacht, mit 7 Tagen pro Woche geht bereits auf die Babylonier zurück.³⁷ Allerdings begann bis Anfang des 20. Jahrhunderts in Europa ein neuer Tag um 12 Uhr mittags, in vielen östlichen Ländern mit dem Sonnenaufgang.³⁸ Auch die 7-Tage-Woche hat sich mittlerweile auf allen Kontinenten durchgesetzt. Sie wurde aus dem babylonischen System durch die Hebräer übernommen und verbreitet. Die Regelungen für Jahre und Monate unterscheiden sich hingegen in den verschiedenen Kulturkreisen beträchtlich. Heute gibt es immer noch weit über 20 verschiedene Kalender,³⁹ in Ländern wie China, Korea, Japan oder im Hinduismus sind sogar mehrere Kalender gebräuchlich. Die Jahreszahl unterscheidet sich von allen gegenüber dem gregorianischen Kalender; alle zählen von einem anderen Zeitpunkt. Es sind aber meist Sonnenkalender. Dieser orientiert sich am Sonnenjahr mit einer Länge von ca. 365 ¼ Tagen. Im arabischen und jüdischen Kalender ist das Mondjahr die bestimmende Länge für ein Jahr. Aus astrologischer Sicht⁴⁰ kommen die Jahreslängen auch der wichtigsten Planeten in Betracht, auch wenn man sie nicht als Kalender bezeichnet. Auch der Bezugspunkt für das Zählen der Jahre kann wechseln. In den arabischen Ländern ist es ein reiner Mondkalender, wobei die Jahre von der Flucht des Propheten Mohammed (Hidschra oder Hedschra) von Mekka nach Medina und seine Ankunft in Qubā am 24. September 622 gezählt werden. Dadurch verschieben sich wichtige Ereignisse, wie der Fastenmonat Ramadan, bezogen auf unseren westlichen Kalender regelmäßig im Jahr, weil das

³⁶ Entgegen der gängigen Meinung ist übrigens der Abstand Erde-Sonne im Winter kleiner als im Sommer. Der Unterschied ist gering. In Sonnennähe, dem Perihel, beträgt er 147,1 Millionen Kilometer, im Aphel 152,1 Millionen Kilometer.

Die Neigung der Erdachse mit der Auswirkung auf die Anzahl der Sonnentage und der Sonneneinstrahlung ist der entscheidende klimatische Einflussfaktor. Die Sonne steht in Deutschland im Sommer 60 bis 65 Grad über dem Horizont und sie kann 16-17 Stunden scheinen. Im Winter steht sie mittags weniger als 20 Grad über dem Horizont und scheint nur maximal 8 Stunden.

³⁷ <https://de.wikipedia.org/wiki/Zeitmessung>, Grund ist ihr Zählssystem auf Basis 12.

³⁸ Filk, Giuliani, ebenda, S. 17 f

³⁹ <https://de.wikipedia.org/wiki/Jahr>

⁴⁰ Quelle der Abbildung 4:

https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/fb/ZodiacCC_-_Degrees_Dates_Names_Move_DE.svg

Lunarjahr etwa elf Tage kürzer ist. Der iranische Kalender, um ein Beispiel zu nennen, auch persischer Kalender oder Dschalāli-Kalender genannt, wird in der heutigen Form seit 1925 auf Beschluss des iranischen Parlaments als amtlicher Kalender im Iran verwendet. In der Folge wurde er auch in Afghanistan eingeführt. Es ist im Gegensatz zum arabischen ein Sonnenkalender, wobei der Jahresbeginn die Frühlingstagundnachtgleiche (Nouruz) ist. Das Jahr ist ein Sonnenjahr mit einer festen Länge von 365 Tagen, in Schaltjahren 366 Tagen, und besteht aus 12 Monaten zu 31, 30 oder 29 Tagen. Gezählt werden die Jahre wie beim traditionellen islamischen Mondkalender seit der Hidschra. Dementsprechend wird die Zählung als hidschri schamsi („Sonnen-Hidschra“) bezeichnet – im Unterschied zur Jahreszählung nach dem islamischen Mondkalender, hidschri qamari („Mond-Hidschra“).⁴¹ Trotzdem ist es ein vorislamischer, mindestens 3000 Jahre alter Kalender und das Neujahrsfest Norouz⁴² oder Nouruz wird von ca. 300 Millionen Menschen auf der Balkanhalbinsel, in der Schwarzmeerregion, im Kaukasus, in Zentralasien und im Nahen Osten heute noch in Form nicht religiöser Riten und Ritualen gefeiert, wenn die Sonne in das Tierkreiszeichen Widder eintritt. Zwei der vielen Bestandteile des Festes sind das Mittwochsfeuer und ein festlich gedeckter Tisch mit sieben obligatorischen Elementen und weiteren Glücksbringern, den Haft Sin.^{43,44}

Entsprechend lassen sich in den genannten mehr als 20 Kalendern noch viele weitere Besonderheiten feststellen. Oft ist die Verweildauer im jeweiligen Tierkreiszeichen ein Kriterium für die Dauer eines Monats. Dies war in früheren Kalendern auch im z.B. im altiranischen oder ägyptischen Kalender konsequenter der Fall. Es wurde aus praktischen Gründen etwas aufgeweicht, um die Dauer eines Monats nicht zu sehr variieren zu lassen, stimmt aber immer noch in guter Näherung.

In der christlichen Kultur hatte vor allem das Osterfest und seine Berechnung erhebliche Bedeutung auf den Kalender. In den ersten 50 Jahren wurden Schaltjahre im neuen Julianischen Kalender eher nach Belieben eingeführt. Dieser Kalender wurde 46 v. Chr. von Julius Caesar (beraten durch den Mathematiker und Astronomen Sosigenes in Alexandria) eingeführt.⁴⁵ Der Frühlingspunkt wurde auf dem Konzil von Nicäa 325 n.Chr. auf den 21. März festgelegt und das Osterfest wurde danach berechnet. Im 16. Jahrhundert stellte man immer größere Diskrepanzen fest. Der Frühlingspunkt war

⁴¹ <http://www.kultur-in-asien.de/Kalender2/irankal6.htm> und weitergehende https://de.wikipedia.org/wiki/Iranischer_Kalender

⁴² <https://www.kulturkluengel.de/kulturen/iran/norouz/>

⁴³ Siehe <https://de.wikipedia.org/wiki/Nouruz> oder z.B. https://www.aachener-nachrichten.de/panorama/alles-was-sie-ueber-das-persische-neujahrsfest-wissen-muessen_aid-37577809. Nouruz ist im Jahr 2021 am 20. März, 10:37:28 MEZ.

⁴⁴ Dank für die liebenswürdige Anregung an Frau Farideh Beh Aeen

⁴⁵ Filk, Giulini, ebenda, S. 49

mittlerweile um 10 Tage verschoben und damit waren alle christlichen Feste im Jahr verschoben. Das führte schließlich durch Papst Gregor XIII zu einer Kalenderreform, wonach auf Donnerstag, den 4. Oktober 1582, Freitag, der 15. Oktober 1582 folgen sollte. Der gregorianische Kalender wurde dementsprechend erst in den katholischen Bistümern und Fürstentümern und das noch nicht einmal gleichzeitig, eingeführt. Später kamen die evangelischen Gebiete, sowie Dänemark und Norwegen, dazu. Preußen war 1610 der letzte Staat. Bei gemischter Religionszugehörigkeit wurde in der Übergangszeit gar zweimal Ostern gefeiert. Erst 1778 einigte man sich auf eine einheitliche Berechnung des Ostertermins. Manche Länder schlossen sich erst im 20. Jahrhundert an: Russland 1918 (die „Oktoberrevolution“ begann also am 7. November 1917), Griechenland 1923, Türkei 1925, Ägypten 1928. Die griechisch-orthodoxe Kirche stellte sich 1924 um, die koptisch-orthodoxe Kirche in zahlreichen osteuropäischen Ländern sowie die äthiopische und armenische Kirche richten sich heute noch nach dem julianischen Kalender.⁴⁶ International ist der gregorianische Kalender in vielen Staaten bindend. In diesem ist seit 1691 durch Papst Innozenz XII. der Jahresbeginn auf den 1. Januar festgesetzt worden. Näheres regelte in Deutschland die DIN 1355-1 Norm, die durch die europäische Norm EN 28601 ersetzt wurde. Dort sind auch Schreibweisen und Abkürzungen, wie Jan., Febr., aber auch Jan, Feb, Mrz (ohne Punkt) usw. oder v. Chr. Geb. bzw. v. Chr., sowie fachgebietsspezifische Ausnahmen festgelegt. So gibt es in der Regel kein Jahr 0 (Null), außer im astronomischen Zusammenhang.

Neben dem Kalenderjahr oder bürgerlichem Jahr gibt es eine ganze Reihe von wirtschaftlichen, religiösen oder juristischen Jahresdefinitionen, wie das Jagdjahr, Bankjahr oder sogar das Braujahr. Auch das firmenindividuelle Geschäftsjahr muss nicht mit dem Kalenderjahr zusammenfallen. Das Kirchenjahr beginnt bei den beiden großen christlichen Konfessionen am ersten Adventssonntag, im orthodoxen Christentum am 1. September.

Auch Kalender können sich nur an einer verstetigten Zeit orientieren. Alle natürlichen Zeitmaßstäbe bis hin zum Tag können leicht differieren. Astronomen definieren eine absolute Zeit als Mittelwert der Schwankungen. Noch bis in die 50er Jahre wurde die sogenannte „Ephemeridenzeit“ als besten Kompromiss angesehen. Es ist eine astronomisch bestimmte Zeit gemäß den Positionen einiger Planeten unter Berücksichtigung der Allgemeinen Relativitätstheorie. Heute betrachtet man Schwingungen in Atomen als beste gleichförmige Bewegung, mit der sich eine Metrik definieren lässt. Wir sind auch nicht in der Lage zu entscheiden, ob sich eine bestimmte Bewegung, z.B. die Rotation der Erde als Referenz, im Laufe der Jahrhunderte geändert hat, also heute verzögert oder beschleunigt ist. Man bemerkte auch Schwankungen bei den Umlaufzeiten des Mondes, die man sich nicht erklären konnte. Die möglichen

⁴⁶ Filk, Giuliani, ebenda, S. 51 f

Störeffekte waren eigentlich bekannt und relativ leicht zu berechnen. Dies gilt insbesondere für Ebbe und Flut und ihre Bremswirkung. Heute weiß man, dass Fluktuationen im Erdinneren dafür verantwortlich sind.

Unser Tagesrhythmus ist durch den mittleren Sonnentag (UT1) bestimmt. Dieser verändert sich und kann nicht als physikalischen Maßstab dienen, sonst würden sich die Naturgesetze im Lauf Zeit ändern. Ein Pendel würde langsamer schwingen, die Frequenz einer Farbe würde sich formal ändern. Die physikalische Zeit basiert deshalb auf einer technischen Definition (SI-Sekunde mittels Cs-Atomuhren auf Meereshöhe) als Temps Atomique International (TAI) und ist am 1.1.1958, 0 Uhr definitionsgemäß gleich UT1 gesetzt worden. Seit diesem Zeitpunkt laufen diese beiden „Zeiten“ auseinander. Sie mussten durch einen Kompromiss auch wegen der immer genauer benötigten Lebenswirklichkeit in Form der UTC (Coordinated Universal Time) angepasst werden. Dieser Kompromiss hat auch negative Seiten. Insbesondere für astronomische Zeiten, gerade auch bei Vergleichsmessungen über lange Zeiträume, stören Schaltsekunden, aber man muss trotzdem relativistische Effekte berücksichtigen.⁴⁷ So entstand die dynamische Zeit, die von der International Astronomical Union (IAU) und nicht von der Generalkonferenz für Maß und Gewicht (Conférence Générale des Poids et Mesures; CGPM) verantwortet wird.

„Uhrzeit“ und Kalenderzeit ist dadurch eine aufgabenorientierte menschliche Konvention auf der Erde geworden.

Nur auf atomarer Ebene haben sich charakteristische Zeitspannen und Abstände nicht verändert. Ein Wasserstoffatom ist genau so groß wie 380.000 Jahre nach dem Urknall, als sich Protonen und Elektronen verbanden. Die Anregungsfrequenzen der Elektronen in den Elementen sind ebenfalls gleichgeblieben und können deshalb als metrologische Referenz für die Einheit der Sekunde dienen.

Der Weg zur Weltzeit

Im beginnenden 19. Jahrhundert waren Uhren längst nicht mehr nur im vermögenden Bürgertum ein Statussymbol, sondern ein allgegenwärtiger

⁴⁷ Die besten astronomischen „Uhren“ sind Pulsare. Man ist sich ziemlich sicher, dass es sich um schnell rotierende Neutronensterne handelt, deren Achse ihres Magnetfeldes und deren Rotationsachse nicht zusammenfallen. Die gepulste Sychrotronstrahlung trifft die Erde wie ein Leuchtturm in streng periodischen Abständen von max. 4 Sekunden bis hin zu einer $\frac{1}{1000}$ Sekunde . Die Perioden wurden mit modernen Atomuhren bis zu 15 relevanten Stellen hinter dem Komma vermessen. Leider wird die Periode täglich im Nanosekundenbereich schneller und Pulsare können sprunghaft ihre Periode ändern, vermutlich wegen tektonischer Effekte. Sie eignen sich deshalb nicht als metrologisch definierte Uhr.

Gebrauchsgegenstand. Das Zeitverständnis wurde, wie dargelegt, aber erst langsam verändert. Man kann sagen, es trennte psychologisch am Anfang noch nicht die Uhrzeit vom naturgegebenen Rhythmus. Bindung der Zeit an die Natur und den Ort, also die Ortszeit, gehen bis zur zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts. Früh war man sich bewusst, welchen wirtschaftlichen Nutzen eine zumindest überregionale Harmonisierung von lokalen Ortszeiten hat. Außerdem hat man die Querbeziehungen zwischen Zeitmessung und Entfernungs- bzw. Landvermessung gesehen. Schon um 1668 legte man in Frankreich einen Nullmeridian in Paris fest. Die Begeisterung war zunächst groß. Es zeigte sich aber schon in ersten Schätzungen, dass Frankreich ca. 20% kleiner war, als gedacht und Brest 140 km näher an Paris lag.⁴⁸ Aber im Laufe der Jahrhunderte und besonders dann mit Beginn der Neuzeit unter dem Einfluss der großen Philosophen, Naturforscher und Mathematiker sollte sich Zeitverständnis und Umgang mit der Zeit, also Zeitmentalität, grundlegend verändern. Die Pendeluhrn des niederländischen Mathematikers Christiaan Huygens, brachten eine riesige Verbesserung in der Genauigkeit. Er veröffentlichte 1673 in seiner Abhandlung *Horologium Oscillatorium* eine ganggenaue Pendeluhr mit einem Zykloidenpendel.⁴⁹ Die Erfindung der Taschenuhren (auch Sackuhren genannt) schreibt man Peter Henlein (um 1479–1542) aus Nürnberg zu. Er hat um 1511 einen Federantrieb in Verbindung mit einem Hemmmechanismus der Federbremse gebaut.⁵⁰ Taschenuhren machten die Zeitmessung mobil und transportabel. Das industrielle Zeitalter stand zwar noch bevor, aber diese Erfindungen markierten zusammen mit anderen Umwälzungen den Übergang zur Moderne. Es gab bald schon ein durchorganisiertes Verkehrswesen, innerstädtisch mit von Pferden gezogenen Omnibussen und zur Überwindung größerer Strecken wurde die Postkutsche benutzt. Der Gleisbau begann ca. 1530 mit zunächst auf hölzernen Gleisen fahrende Hunten oder Loren. Bis zum Ende des 18. Jahrhunderts entwickelte sich im englischen Bergbau das System mit spurkranzgeführten Rädern. Beginn der Eisenbahnen im heutigen Sinne markiert das Jahr 1804, als Richard Trevithick die erste Dampflokomotive in Betrieb nahm. Das Verkehrswesen wurde nach und nach durch ein immer größeres Streckennetz ergänzt, auf dem Eisenbahnen nach Fahrplan verkehrten. Trotzdem galt in jeder Stadt und jedem Marktflecken lange die jeweils eigene Ortszeit. Dies gilt übrigens auch für andere technische oder gar juristische Themen. Maße und Gewichte waren ebenfalls fast von größerem Ort

⁴⁸ Paul Murdin, *Die Kartenmacher*, deutsch bei Artimis&Winkler, Mannheim, 2010

⁴⁹ https://de.wikipedia.org/wiki/Christiaan_Huygens,
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/phbl.19950510737>

⁵⁰ <https://de.wikipedia.org/wiki/Taschenuhr>

zu größeren Ort unterschiedlich.⁵¹ Die Epoche wurde deshalb schon durch die wirtschaftliche Verflechtung zur Epoche der Standardisierung. Das zunehmend delokalisierte Wirtschaftsleben hatte eine enorme Zunahme der Mobilität zur Folge.⁵² Der Kulturhistoriker William Everdell spricht von einer „Veränderung im Tempo des Wandels.“⁵³ Auch die unterschiedlichen Zeiten wurden dadurch zum wirtschaftlichen Problem und wurden zuerst auf nationaler Ebene nach und nach beseitigt. International fand noch keine Harmonisierung statt, obwohl Telegraphenverbindungen bereits länderübergreifend installiert wurden.

Im Alleingang konnte dies ein in Schottland geborener und nach Kanada ausgewandeter Vermessungsingenieur namens Sandford Fleming⁵⁴ nicht ändern. Aber er propagierte letztendlich nach einer ersten genialen Idee und in einem persönlichen Entwicklungsprozess eine Weltstandardzeit mit 24 Zeitzonen, wie wir sie heute kennen und er förderte und setzte sie schließlich international durch. Voraussetzung war eine international harmonisierte Stundenzählung von 1 bis 24, ein geografischer Bezugsrahmen mit einem Nullmeridian und, wie sich zeigte, vielen internationalen Vereinbarungen. Eine dekadische Einteilung der Uhrzeit, die im nach-revolutionären Frankreich anfangs propagiert wurde, scheiterte schon in Frankreich relativ rasch und hatte für die Weltzeit keine Bedeutung (siehe Abbildung 2 „Revolutionsuhr“).

Der Erfolg Flemings hat sich bei weitem nicht auf die Forcierung des internationalen Normungsprozesses beschränkt.

Bereits nach fünf Jahren hatte er sich zuerst in Petersborough und dann Toronto einen Namen als Landvermesser und Lithograph gemacht. Er erstellte einen genauen Stadtplan von Toronto, sondierte den Hafen, plante Eisenbahnlinien und gründete das Canadian Institute, der Vorläufer der späteren Royal Society of Canada. Der Queen´s University in Kingston diente er 35 Jahre als Kanzler und schrieb ein Dutzend Bücher. Seinen Adelstitel verdankte er schließlich der Verlegung des Telegraphenkabels durch den Pazifik von Canada nach

⁵¹ Siehe dazu https://de.wikipedia.org/wiki/Geschichte_der_Maße_und_Gewichte. Zu den praktischen Schwierigkeiten und mathematischen Herausforderungen bei der Erstellung topografischer Karten und geodätischen Berechnungen siehe Dieter Lelgemann, Gauß und die Messkunst, Wissenschaftliche Buchgemeinschaft (WBG) Darmstadt 2011, im Buchhandel durch Primus Verlag, Darmstadt

⁵² Clark Blaise widmet diesem Vorhaben sein Buch „Die Zähmung der Zeit“, Fischer 2004. Die Aussagen in diesem Kapitel sind entscheidend von diesem Werk geprägt. Der später geadelte Sir Sandford Fleming ist die Figur im Mittelpunkt, aber gleichzeitig ist seine Leistung nur im historischen Zusammenhang der 2. Hälfte des 19. Jahrhunderts zu verstehen. Dem trägt das Werk in hohem Maße Rechnung.

⁵³ „Change in the pace of change“, William R. Everdell, The First Moderns, University of Chicago Press, 1997, zitiert nach The Bactra Review: Occasional and eclectic book reviews by Cosma Shalizi, <http://bactra.org/reviews/first-moderns>

⁵⁴ Quelle der Abbildung 5:

https://en.wikipedia.org/wiki/Postage_stamps_and_postal_history_of_Canada

Australien. Dadurch wurde über das staatliche englische Telegraphennetz eine weltumspannende Kommunikation möglich.⁵⁵

Auf seine Initiative wurde 1884 die Meridiankonferenz in Washington DC einberufen, an der 25 Staaten teilnahmen. Der Meridian durch Greenwich wurde dort nach erbitterten Diskussionen als Bezugs-Meridian für die Weltzeit empfohlen. Die Einteilung der Erde in 24 Zeitzonen hatte somit den Vorteil, dass dadurch die große Zahl von Ortszeiten auf 24 Ortszeiten reduziert wurde.

Doch dieser, heute klaren Organisation der Weltzeit ging ein hartes Ringen voraus, das stark von nationalen Interessen und Empfindlichkeiten geprägt war. Bewegung in die Positionen konnten nur wirtschaftliche und nicht zu vergessen militärische Interessen bringen, denen alle zustimmen konnten. So hatte Deutschland damals fünf offizielle Zeiten, was einer Kriegsvorbereitung im



Abb. 5: Vielseitiges Genie:
Die erste canadische
Briefmarke wurde von Sir
Sandford Fleming
entworfen.

Wege stand. Doch zunächst hielten die großen Mächte an ihren eigenen Vorstellungen fest.⁵⁶ Es entstanden immerhin über Jahre entsprechendes wirtschaftlich und militärisch wertvolles Material in Form von See- und Landkarten sowie staatliche Institute und Organisationen mit astronomischer und technischer Kompetenz. Die USA als Gastgeber hatte bereits früh nach einem kurzen Versuch mit einem Nullmeridian durch Washington DC zugunsten Greenwich verzichtet. Das wog bei dem riesigen Gebiet der Vereinigten Staaten über viele Längengrade durchaus schwer. Nach zähen Verhandlungen akzeptierten schließlich neun

andere Staaten⁵⁷ mit eigener „Zeitinfrastruktur“ den Nullmeridian von Greenwich. Nur Frankreich kämpfte bis zum Schluss um seine *ligne sacrée*, den Pariser Meridian.⁵⁸ Erst bei der entscheidenden Abstimmung, wo ein Scheitern wirtschaftliche Nachteile bedeutet hätte, enthielt sich die französische Delegation der Stimme. Aber: Es war der Beginn einer Weltzeit, wie wir sie heute kennen. Darüber hinaus waren allerdings viele organisatorische und technische Absprachen zu treffen. Dazu wurden die erforderlichen telegraphisch übermittelten Zeitzeichen auch ein wirtschaftlicher Faktor. Korrekte Uhrzeit wurde zur Ware. Auch heute ist Zeitnormale, Zeitübertragung

⁵⁵ Clark Blaise, Die Zähmung der Zeit“, Fischer 2004, S. 13 ff

⁵⁶ Clark Blaise, Die Zähmung der Zeit“, Fischer 2004, S. 250

⁵⁷ Darunter Berlin, Bern, Uppsala, Sankt Petersburg, Rom, Cadiz sowie eben Paris

⁵⁸ Clark Blaise, Die Zähmung der Zeit“, Fischer 2004, S. 246 ff

und Zeitverbreitung eine wichtige Aufgabe, die aber hoheitlich durch die Physikalisch-technische Bundesanstalt und nicht durch Telegraphengesellschaften übernommen wird.

Sandford Fleming, obwohl Canada damals kein eigener Staat war, war Ehrenmitglied der britischen Delegation. Er hatte anerkanntermaßen großen Anteil am erreichten Ziel. Allerdings hatte er in dem ganzen Prozess durchaus Niederlagen einstecken müssen.

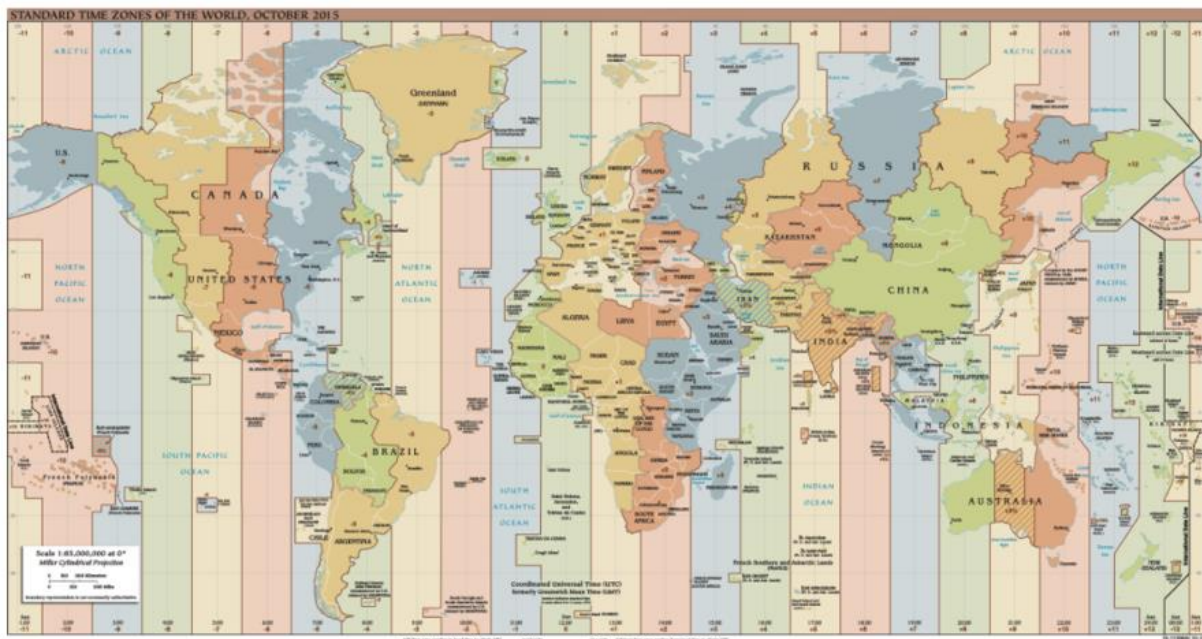


Abb. 6: Heutige Zeitzonen der Welt⁵⁹

Zeit in der Wissenschaft – Galileo Galilei

Was Galileo als einen der ersten Naturwissenschaftler⁶⁰ ausmachte, war die Tatsache, dass er erst aus der Kombination von Experiment oder Beobachtung, logischem Denken und mathematischer Beschreibung seine Erkenntnisse bezog. Archimedes war sein großes Vorbild. Was dieser in dem Gebiet der Statik erreicht hatte, wollte Galilei bei der Dynamik erreichen.⁶¹ Er prangerte die Vorgehensweise von Aristoteles an, vor allem seine Empirie, die einer systematischen Beschreibung der Natur mit mathematischen Mitteln im Wege stand. In seiner Bewegungslehre widersprach er gängigen, seit Aristoteles etablierten Vorstellungen und verletzte damit durchaus auch den gesunden Menschenverstand (und die Gefühle von Anhängern der geltenden Lehre).

⁵⁹ Quelle der Abbildung 6: [https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Standard_Time_Zones_of_the_World_\(October_2015\).svg](https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Standard_Time_Zones_of_the_World_(October_2015).svg)

⁶⁰ Siehe für diese Bezeichnung auch Carl Friedrich von Weizsäcker, Große Physiker, Vorträge, Carl Hanser, München Wien 1999, S. 105 ff

⁶¹ Von Weizsäcker, ebenda, S.110

Berühmtes Beispiel sind die Fallgesetze, wo er folgerte, dass eine Feder und eine Kugel ohne Luftwiderstand gleich schnell fallen.⁶² Dies widersprach völlig der Erfahrung. Die gleichen Betrachtungen gelten für das Trägheitsprinzip. Auf Aristoteles geht die Behauptung zurück, dass Bewegung immer eine Kraft erfordere, die diese Bewegung erst ermöglicht. Es war eine große geistige Leistung, von den alltäglich wirkenden Kräften zu abstrahieren, die einen Körper in der Praxis immer beeinflussen, so dass er nicht ungebremst immer einer geraden Linie folgen kann oder dass zwei unterschiedlich schwere Körper ohne Luftwiderstand gleich schnell fallen können. In einer perfekt inszenierten Szene in seinem erst 1632 erschienenen „Dialog“ hat er das Trägheitsprinzip anhand



Abb. 7: Galileo Galilei, Porträt von Justus Sustermans (1636)

Bewegungen in einem geschlossenen Schiffsrumpf beschrieben.⁶³ Analog hat er erkannt, dass gleichmäßige Beschleunigung die stetige Veränderung der Geschwindigkeit als Weg pro Zeiteinheit zum Quadrat ist.

Er begriff, dass Beschleunigung grundsätzlich anders als Geschwindigkeit ist. Insbesondere ist der freie Fall eine konstant beschleunigte Bewegung und die Beschleunigung ist auf der Erde⁶⁴ $g=9,81 \frac{m}{s^2}$. Der meist verwendete Buchstabe g wird zu Ehren von Galilei benutzt. „ \vec{g} “ ist vektoriell zu verstehen, da die Gravitationskraft zum Erdmittelpunkt wirkt. Die Beschleunigung beschäftigte Galilei über 40 Jahre. In alle dynamischen

Probleme musste er somit für die Beschreibung von Bewegungsgesetzen die Zeit als Parameter einbeziehen und er musste idealisieren, um unabhängig von unserer Sinnenwelt physikalische Gesetze formulieren zu können. Der Gegenstand der Forschung hat sich bei ihm radikal verändert. Nicht die Phänomene stehen im Fokus, sondern die Gesetze.⁶⁵ Die Mathematik ist sehr

⁶² Diese Tatsache führte Einstein zur Allgemeinen Relativitätstheorie

⁶³ Doch das Eintreten für das kopernikanische Weltbild im „Dialog“ hat zur Vorladung vor die Inquisition und seiner Verurteilung geführt. Der Dialog wurde auf den Index Librorum Prohibitorum gesetzt und daraus erst 1835 gestrichen.

⁶⁴ Der Wert schwankt etwas, da die Erde keine exakte Kugel ist bzw. die Masseverteilung leicht unterschiedlich ist. Der Wert gilt in etwa für Deutschland.

⁶⁵ Siehe dazu Henning Genz, Wie die Naturgesetze Wirklichkeit schaffen, Hanser, S. 86 ff

wichtig, aber lediglich als Werkzeug. Es geht nicht um ein mathematisches Modell der Wirklichkeit, sondern um die Realität selbst.

Die Erneuerung der Naturwissenschaften, für die hier Galilei steht, aber auch Descartes, Huygens, Leibniz, Newton und andere, möchte mechanische Erklärungen der Welt liefern. Sie haben ein mechanistisches Weltbild. Descartes verglich nicht nur Tiere mit Automaten, er sah sie unter einem mechanistischen Paradigma.⁶⁶

Galilei ging auch als Experimentator neue Wege. Er verwendete eine schiefe Ebene, um Bewegung verlangsamt studieren zu können.⁶⁷ Da keine Uhren zur Verfügung standen, die kurze Zeitspannen verlässlich messen konnten,

„Die Philosophie steht in diesem großen Buch geschrieben, dem Universum, das unserem Blick ständig offen liegt. Aber das Buch ist nicht zu verstehen, wenn man nicht zuvor die Sprache erlernt und sich mit den Buchstaben vertraut gemacht hat, in denen es geschrieben ist. Es ist in der Sprache der Mathematik geschrieben, und deren Buchstaben sind Kreise, Dreiecke und andere geometrische Figuren, ohne die es dem Menschen unmöglich ist, ein einziges Wort davon zu verstehen; ohne diese irrt man in einem dunklen Labyrinth herum.“

Abb. 8: Galileo Galilei, II
Saggiatore, Rom 1623

benutzte er seinen Herzschlag als Zeitgeber.

Paradoxerweise erwies sich sein wahrscheinlich erster

Untersuchungsgegenstand, das Pendel und

seine Periode, als zeitunabhängig. Die

Periode ist nur von der Länge der Aufhängung

abhängig und die Periode bleibt zumindest bei

kleinen Schwingungen unabhängig von der

Auslenkung gleich. In der Würdigung Galileis

muss man die herausragende Bedeutung

seiner Leistungen auf vielen Gebieten

uneingeschränkt anerkennen.

Problematisch ist die Notwendigkeit, zwischen

seiner Lebensleistung und seinem Mythos zu

differenzieren, sowie seine philosophischen

Wurzeln und seine Haltung zur Kirche zu

analysieren.

Seine Anhänger verorten ihn gerne in der

Philosophie Platons, weil auch dieser die

Mathematik propagierte, während Aristoteles

schon alleine durch Empirie und strikter

Orientierung an den Phänomenen der

Alltagsrealität die Mathematik weitgehend

ausschloss. Allerdings ging Galilei über die reine Mathematik Platons hinaus, indem er mathematisches Vorgehen auf die Natur anwandte.⁶⁸

⁶⁶ Quelle der Abb. 7: https://de.wikipedia.org/wiki/Galileo_Galilei

⁶⁷ Studien für den freien Fall am schiefen Turm von Pisa sind nicht belegt. Aber als Gedankenexperiment sind sie durchaus wahrscheinlich.

⁶⁸ Im nebenstehenden Kasten Abb. 8 sein berühmtes Zitat, hier zitiert nach https://de.wikipedia.org/wiki/Galileo_Galilei

Von Weizsäcker⁶⁹ lehnte es auch ab, Galilei als Märtyrer zu bezeichnen. Galilei suchte nicht um den Preis seiner religiösen bzw. weltanschaulichen Überzeugung den Konflikt mit der Kirche. Er vertrat vor der Inquisition die Auffassung, dass man nicht nur im heiligen Buch der Worte, sondern auch im Buch der Natur lesen sollte. Die Kirche tolerierte die kopernikanische Lehre als hypothetisches, mathematisches Modell, das durchaus Vorteile bei der Beschreibung der Phänomene hatte. Galilei ging aber darüber hinaus und kam deshalb in Konflikt mit der Kirche. Für ihn war es Realität. „Eppur Si Muove - Und sie bewegt sich doch!“ ist ein Satz, den er trotzig (über die Erde) gegenüber der Inquisition gesagt haben soll, was aber nicht belegt ist. Aber er hat ihn höchstwahrscheinlich gemeint. Mit seiner Verurteilung hat sich die Kirche vielleicht am meisten geschadet. Galileo Galilei wurde 1992 von Papst Johannes Paul II. rehabilitiert.

Auf jeden Fall hat Galilei, was für diesen Beitrag am wesentlichsten ist, die experimentell abgesicherte, wissenschaftliche Mechanik maßgeblich mitbegründet, die Zeit als physikalischen Parameter etabliert und die Mathematik nicht nur auf die Bewegungen am Himmel, sondern auch auf die irdische Mechanik angewendet.

Zeitverläufe

Galilei als Begründer der Dynamik abstrahiert, zumindest in den erstaunlich einfachen Gesetzen, zu denen er durch Experiment, Logik und Mathematik kommt, von der zeitlichen Entwicklung. Er geht in den mathematischen Formeln von einer symmetrischen Zeit aus. Das heißt physikalisch, dass im Prinzip alle dynamischen Vorgänge reversibel ablaufen könnten. Man kann sagen, dass dies (mit kleinen Ausnahmen bei Phänomenen der Symmetriebrechung) bei allen grundlegenden Naturgesetzen der Fall ist.

Anders ist die Situation, wenn die Entropie ins Spiel kommt.⁷⁰ Die beiden ersten fundamentalen Hauptsätze der Thermodynamik sind die Feststellungen, dass Energieformen ineinander umgewandelt werden können, aber die Gesamtenergiebilanz immer gleich ist. Daraus folgt der Energieerhaltungssatz. Der zweite Hauptsatz besagt, dass die Entropie in geschlossenen Systemen höchstens gleichbleibt, aber in der Regel zunimmt. Im Gegensatz zur Energie hat die Entropie somit etwas mit Wahrscheinlichkeit zu tun.⁷¹ Entropie ist

⁶⁹ Von Weizsäcker, ebenda, S.113 ff

⁷⁰ Siehe auch für dieses Kapitel Willi Kafitz, Entropie, Oberhessische naturwissenschaftliche Zeitschrift, Band 68, Gießen 2020, S. 50 ff oder online http://geb.uni-giessen.de/geb/frontdoor.php?source_opus=15768&la=de

⁷¹ $S = -k_B \sum_i p_i \ln(p_i)$ Die Entropie S ergibt sich aus der Summe der Wahrscheinlichkeiten p_i und deren natürlichen Logarithmus aller möglichen

proportional zum Logarithmus der Anzahl möglicher Zustände. Betrachtet man den zeitlichen Ablauf ohne Kompensation durch Energiezufuhr, so liegt die geringere Entropie oder höhere Ordnung praktisch immer in der Vergangenheit; die höhere Entropie oder das Informationsdefizit praktisch immer in der Zukunft. Entropie definiert somit die Richtung des Zeitpfeils; sie ist zumindest bei makroskopischen Vorgängen schlechthin die Ursache für das, was wir als „Zeit“ bezeichnen. Dabei „läuft“ die Zeit immer weiter. Wir verstehen die Zeit als lineare Progression von Vergangenheit zu Zukunft.⁷²



Abb. 9: Sir Arthur Stanley Eddington

Die Erde ist kein geschlossenes System. Selbstorganisation bis hin zu komplexen Lebensformen werden durch die ständige Energiezufuhr der Sonne ermöglicht. Vorgänge, die sich aus den Wahrscheinlichkeiten vieler Mikrozustände ergeben, sind nicht reversibel. Man sagt, sie sind T-invariant. Wenn ein Ei vom Küchentisch rollt und zerbricht, dann ist dieses Ereignis nicht umkehrbar, weil die enorme Entropiezunahme nicht zu kompensieren ist. Trotz der energetischen Kompensation durch die Sonne ist also der Zeitpfeil insbesondere in vielen makroskopischen Vorgängen, wie den Vorkommnissen des Alltags, erkennbar. Es gibt zumindest auf der makroskopischen

Ebene keinen Prozess, der vollständig reversibel ist. Immer entstehen nicht nutzbare Wärme oder sonstige Energieformen, die die Entropie erhöhen. Der Belgier Ilya Prigogine (1917-2003) hat sich mit Zeit, Chaos, Irreversibilität und Selbstorganisation beschäftigt. Er kam zu der Erkenntnis, dass sich der Zeitpfeil auch beim Wachstum an Komplexität und an Selbstorganisation manifestieren lässt.

Das zerbrochene Ei kann man sozusagen als „kosmologisches Experiment“ verstehen, mit dem man Vergangenheit und Zukunft definieren kann. Vergangenheit und Zukunft werden durch einen kurzen, physikalisch,

Mikrozustände i . k_B ist die nach Boltzmann benannte Proportionalitätskonstante. S hat die Einheit Joule durch Kelvin.

⁷² In Bantu-Sprachen findet man linguistisch ein umgekehrtes Zeitverständnis. Die Zeit kommt aus der Zukunft auf sie zu. Unsere Sprache ist ebenfalls nicht ganz frei von dieser Vorstellung, wenn wir von der „kommenden Woche“ sprechen. (<https://homepages.uni-regensburg.de/~brm04014/notes/brackdis.pdf>)

philosophisch und religiös schwer fassbaren Moment getrennt, den man „Jetzt“ oder Gegenwart nennt.⁷³

Der Physiker Arthur Stanley Eddington war der Ansicht, dass der zweite Hauptsatz der Thermodynamik „... das oberste unter den Naturgesetzen“ ist. Er schrieb 1915 in *New Pathways in Science*: „*The law that entropy always increases holds, I think, the supreme position among the laws of Nature.*“

Er hat seine Theorie der Zeit deshalb eng mit der Entropiezunahme verknüpft. Eigentlich geht die Verknüpfung über die Dynamik des Werdens, des Entstehens von Zukunft.⁷⁴ Die Zunahme der Entropie definiert die Richtung des Zeitpfeils („time’s arrow“), von der Vergangenheit zur Zukunft. Schon der Erkenntnistheoretiker Ernst Mach sah eine Verbindung zwischen Zeitpfeil und der Entropie. Er hat sogar vermutet, dass die Entropie des Weltalls eine Art absolutes Zeitmaß darstellen könnte. Das Wesen der physikalischen Zeit ist darin begründet, dass die Vergangenheit sich nicht manipulieren lässt. Auch bei Quanteneffekten, wie der Verschränkung von Teilchen und instantaner Offenbarung von Eigenschaften verschränkter Teilchen über beliebige Entfernungen durch eine Messung, bleibt das Kausalitätsprinzip zumindest bei der Informationsübertragung erhalten.⁷⁵

Dieser Effekt der Verschränkung oder Quantenkorrelation ist für den gesunden Menschenverstand verstörend⁷⁶ und zeigt die Nichtlokalität unserer Welt, aber kann nicht dazu benutzt werden, um Informationen schneller als das Licht zu übertragen. Jedoch zeigt die Relativitätstheorie, dass man nur von relativer Zeit sprechen kann, die z.B. von relativer Geschwindigkeit oder Gravitationsfeldern

⁷³ Siehe Richard A. Muller, *Jetzt – Die Physik der Zeit*, S. Fischer, Frankfurt a. Main, 2018, S. 131

⁷⁴ Siehe Arthur S. Eddington, *The Nature of the Physical World*, New York und Cambridge 1929, S. 87 ff, „Linkage of Entropy with Becoming“ bzw. Eddington, Arthur Stanley, *Das Weltbild der Physik und ein Versuch einer philosophischen Bedeutung*, in Deutsch 1931 bei Springer

⁷⁵ Es gibt Experimente mit verschränkten Teilchen und einem „Schalter“, der bewirkt, dass vollkommen kausal entweder A vor B oder umgekehrt eintritt. Ist der Schalter dagegen ein „Qubit“ in Superposition, ist auch die Reihenfolge im Zustand der Überlagerung und sowohl A vor B und B vor A kommt gleichzeitig vor. (siehe Philipp Walther, Časlav Brukner; *Quantengravitation, Kausalität in der Quantenwelt*, SdW Highlight, 3.20, S.15 ff)

⁷⁶ In einem Gedankenexperiment mit zwei Teilchen, das nach seinen Autoren Einstein, Podolsky und Rosen EPR genannt wird, zeigten sie, dass entweder die Quantentheorie verborgene Variable haben muss oder das in EPR skizzierte Experiment eine sofortige/instantane Offenlegung von zwei gekoppelten Eigenschaften der Teilchen haben müsse. Einstein nannte dies „spukhafte Fernwirkung“. Ein entsprechender Versuchsaufbau wurde 1966 von John Stewart Bell theoretisch entworfen. Erst in den 1980er Jahren standen die experimentellen Methoden dazu zur Verfügung und Alan Aspect zeigte, dass diese Verschränkung oder Korrelation tatsächlich in der Natur existiert.

abhängig ist und damit so eng mit dem Raum verbunden ist, dass man von Raumzeit sprechen muss. Es gibt keine absolute Zeit und man kann deshalb bei zwei räumlich getrennten Ereignissen nicht von Gleichzeitigkeit sprechen. Die Vergangenheit kann die Zukunft beeinflussen, aber nicht umgekehrt. Das newtonsche Verständnis einer kontinuierlich fließenden Zeit muss aufgegeben werden. Eddington war sich der Einschränkungen des Zeitpfeils durch die Relativitätstheorie durchaus bewusst. Er hat sie in einem ausführlichen Referat in Fachkreisen bekannt gemacht⁷⁷ und war Expeditionsleiter für die Sonnenfinsternis-Beobachtung am 29. Mai 1919 auf der Insel Principe, die die Gravitationstheorie Einsteins bestätigte.⁷⁸

Vergangenheit und Zukunft sind nach Eddington von der Entropie bestimmt, die Gegenwart, das „Jetzt“, sind nach Einstein unter dem Blickwinkel der Relativität zu sehen. Der Zeitpfeil behält aber seine Gültigkeit. Der Zeitpfeil zeigt sich nicht nur bei der thermodynamisch begründeten Entropie, sondern auch bei anderen naturwissenschaftlichen Phänomenen, bei denen Irreversibilität und damit eine Zeitrichtung existiert. Beispiele sind der Messprozess in der Quantenmechanik. Ein quantenmechanischer Zustand wird durch eine Wellenfunktion beschrieben, die eine Überlagerung von Wahrscheinlichkeiten darstellt. Erst durch die Messung wird ein definierter Messwert ermittelt. Man spricht vom Kollaps der Wellenfunktion, die somit erst die Zeitrichtung festlegt. Ein zweites Beispiel ist das Verhalten elektromagnetischer Strahlung. Sie tritt immer in retardierter Form auf; die Felder folgen der Quelle immer verzögert, nicht instantan und breiten sich dann mit Lichtgeschwindigkeit aus.

Besonders interessant sind kosmologische Überlegungen unter Einbeziehung von Thermodynamik, Quantenmechanik und Relativitätstheorie.⁷⁹ Neben dem thermodynamischen, elektrodynamischen, quantenmechanischen Zeitpfeil, nennt man heute auch noch den psychologischen, evolutionären und

⁷⁷ A. S. Eddington, Report on the Relativity Theory of Gravitation, London 1918, zitiert nach Albrecht Fölsing, Albert Einstein – Eine Biographie, S. 490. Eddington war übrigens nicht Initiator der Sonnenfinsternis-Expedition nach Principe, die den experimentellen Beweis lieferte, weil er so fest von der Theorie überzeugt war, dass er keine Bestätigung brauchte. Dies war Sir Frank Dyson, Direktor der Sternwarte von Greenwich (ebenda).

⁷⁸ Sir Arthur Stanley Eddington soll von einem Journalisten gefragt worden sein: „Ist es richtig, dass nur drei Menschen die Relativitätstheorie verstanden haben?“ Worauf Eddington geantwortet haben soll: „Ich überlege gerade, wer der dritte ist.“

⁷⁹ Siehe dazu Claus Kiefer, Kosmologische Grundlagen der Irreversibilität, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/phbl.1993049112>
Der Artikel zeigt, wie Thermodynamik, Quantenmechanik und Relativitätstheorie ineinandergreifen und die physikalische Zeitrichtung kosmologisch definieren.

biologischen Zeitpfeil. Interessant ist auch eine subtile Verletzung der CP-Symmetrie. Daraus folgt eine Verletzung der T-Invarianz.⁸⁰

Bei der „topologischen Zeit“ sollte man zwei Aspekte berücksichtigen. Da ist das, was Eddington mit dem thermodynamisch begründeten Zeitpfeil von Vergangenheit zu Zukunft meint. Es gibt aber auch die zeitlich ungerichtete Reihenfolge von Augenblicken im Sinne etwa von verbundenen Momentaufnahmen. Drei Bilder eines Stoßprozesses zweier Billardkugeln können geordnet sein, aber sind dann im Sinne des Zeitpfeils ungerichtet, wenn die zeitliche Reihenfolge umgedreht wird. Diese Ordnung spielt dann eine Rolle, wenn in neueren Theorien der Parameter „Zeit“ quasi „verloren“ geht und neu eingeführt werden muss.

Beide Aspekte sind unabhängig voneinander.

Zeit und Raum bei Newton und Leibniz

Wo Galilei noch Herzschläge zählen musste, entwickelte sich mit der Pendeluhr und mit der Unruh eine um viele Größenordnungen genauere Zeitmessung als es mit bisherigen Messmethoden möglich war. Erstmals wurden mit der weiteren Perfektionierung Minuten und sogar Sekunden angezeigt. Der Genauigkeitssprung gegenüber früher war durchaus mit der Erfindung von Atomuhren im 20. Jahrhundert vergleichbar. Die genaue Zeit war in der Gesellschaft und in der Wissenschaft angekommen. Dies gilt nicht für die Harmonisierung der Kalender. Isaac Newton wird am 25. Dezember 1642 geboren. Allerdings galt im damaligen England noch der julianische Kalender. Nach dem auf dem Festland vielerorts, nämlich in katholischen Ländern, geltenden gregorianischen Kalender wäre sein Geburtsdatum der 2. Januar 1643.

Newtons Leistung ist über jeden Zweifel erhaben. Aber man darf nicht vergessen, dass er Vorläufer hatte und dass er Annahmen treffen musste, von denen er teilweise selbst nicht überzeugt war. Unschön ist zweifelsohne der erbitterte Prioritätenstreit mit Leibniz um die Infinitesimalrechnung.⁸¹ Der lebenslange Hang zu alchemistischen Theorien und Praktiken, dem er unfassbar viel Zeit widmete und der bizarre Züge trug, hat dagegen seinem Ruhm kaum Abbruch getan.⁸²

Die Achtung vor den Vorläufern hat er mit der Metapher kommentiert

⁸⁰ <https://www.weltderphysik.de/gebiet/teilchen/news/2013/weiterer-teilchenzerfall-mit-cp-verletzung-nachgewiesen/>

⁸¹ Um dem problematischen Begriff des „unendlich Kleinen“ zu entgehen, hat sich heute die Bezeichnung „Analysis“ durchgesetzt.

⁸² <https://www.spiegel.de/wissenschaft/mensch/ueberraschungsfund-geheimnotizen-isaac-newtons-entdeckt-a-363221.html>

“If I have seen further it is by standing on ye shoulders of giants.”

„Wenn ich weiter geblickt habe, so deshalb, weil ich auf den Schultern von Riesen stehe.“⁸³

Er meinte sicher vor allem Kepler, aber auch Galilei.

Es sind für die Beurteilung seiner wissenschaftlichen Leistung drei große physikalische Themenkomplexe von herausragender Bedeutung.

Für die allgemeinen Bewegungsgesetze hatte Galilei Vorarbeit geleistet, insbesondere bei dem wichtigen Trägheitsgesetz. Die keplerschen Gesetze konnte Newton aus diesen Gesetzen herleiten. Allerdings akzeptierte er im Gegensatz zu Galilei das Trägheitsgesetz nur für geradlinige Bewegungen. Das führte ihn erst zum Wesen der Gravitation.

Der zweite Themenkomplex ist das Kraftgesetz, oder zweites newtonsches Gesetz, das besagt, dass die Änderung der „Bewegungsgröße“ proportional zur einwirkenden Kraft ist. Erst eine „Kraft“ ist die Ursache einer Bewegungsänderung. Dies hat Newton eigenständig erkannt und die neu entwickelte Infinitesimalrechnung hat ihm dabei wesentlich geholfen.⁸⁴ Allerdings hat er alle Beweise, wie damals üblich, geometrisch geführt.⁸⁵ Die Kraft erzeugt eine ihr proportionale Beschleunigung, die die zweite Ableitung des Ortes nach der Zeit ist. Ist diese positiv, so wächst die Steigung der Funktion, ist sie negativ, so fällt die Steigung (in diesem Punkt, das entspricht also Abbremsen). Newton benutzt den Begriff „Bewegungsgröße bzw. -menge“ und formuliert das Gesetz somit allgemeiner. Die Bezeichnung „Bewegungsmenge“ für Impuls war bis zum Ende des 19. Jahrhunderts gebräuchlich. Die Kraft ist gleich der zeitlichen Änderung des Impulses. Weil der Impuls eines Körpers das Produkt aus der Masse eines Körpers und seiner Geschwindigkeit ist, ist die Impulsänderung einerseits Geschwindigkeitsänderung (positive oder negative Beschleunigung), aber auch (zeitliche) Änderung der Masse(n). Zusammen mit der anziehenden Gravitationskraft, die proportional zum Produkt der Massen und umgekehrt proportional zum Quadrat des Abstandes ist, kann das Gesetz also auch auf die Gravitation angewendet werden. Newton drückt es in der „Principia“ so aus:

⁸³ Brief an Robert Hooke, 5. Februar 1676. Das Gleichnis ist mehrfach vor ihm in unterschiedlicher Form belegt.

⁸⁴ Allerdings hat sich in der heutigen Mathematik die Notation von Leibniz im Prinzip durchgesetzt.

⁸⁵ Die analytische Form newtonscher Mechanik wurde erst im 18. und 19. Jahrhundert von Daniel Bernoulli (1700–1782), Leonhard Euler (1707–1783), Jean Lerond d'Alembert (1717–1783), Joseph Louis Lagrange (1736–1813), William Rowan Hamilton (1805–1865) und Karl Gustav Jakob Jacobi (1804–1851) entwickelt. Newton hat seine „Fluxionsrechnung“ (naiver Vorläufer der Differentialrechnung) zwar entwickelt und sicherlich benutzt, aber sie in der Principia nicht erwähnt.

„Quantitas motus est mensura ejusdem orta ex velocitate et quantitate materiae conjunctim.“⁸⁶

„Die Größe der Bewegung wird durch die Geschwindigkeit und die Größe der Materie vereint gemessen.“

Newtons Gesetze sind somit Differentialgleichungen nach der Zeit.

Philosophiæ Naturalis
PRINCIPIA
MATHEMATICA.

DEFINITIONES.

DEFINITIO I.

Quantitas materiae est mensura ejusdem orta ex illius densitate et magnitudine conjunctim.

AER densitate duplicata, in spatio etiam duplicato, fit quadruplus; in triplicato sextuplus. Idem intellige de nive & pulveribus per compressionem vel liquefactionem condensatis. Et par est ratio corporum omnium, quæ per causas quascunque diversimode condensantur. Medii interea, si quod fuerit, interstitia partium libere pervadentis, hic nullam rationem habeo. Hanc autem quantitatem sub nomine corporis vel massæ in frequentibus passim intelligo. Innotescit ea per corporis cujusque pondus: Nam ponderi proportionalem esse reperi per experimenta pendulorum accuratissime instituta, uti posthac docebitur.

DEFINITIO II.

Quantitas motus est mensura ejusdem orta ex velocitate et quantitate materiae conjunctim.

Motus totius est summa motuum in partibus singulis; ideoque in corpore duplo majore, æquali cum velocitate, duplus est, & duplus cum velocitate quadruplus.

B

DEFI.

Abb. 10: Deckblatt
Philosophiæ Naturalis
Principia Mathematica

Die (drittens) Prämissen, Voraussetzungen und Anfangsbedingungen sind bezogen auf die Zeit besonders wichtig. Wenn sich ein Planet um die Sonne bewegt, dann muss er zu Beginn eine Geschwindigkeit durch die Zentrifugalkraft erlangt haben, die der Gravitation als Zentripetalkraft entspricht. Dies muss als Anfangsbedingung zu einem bestimmten Zeitpunkt festgelegt sein.⁸⁷ Newton schreibt⁸⁸ zwar:

„Zeit, Raum, Ort und Bewegung als allen bekannt, erkläre ich nicht.“

Doch genau darin liegen Annahmen und Prämissen über Zeit und Raum. Die Zeit ist vollkommen unabhängig von allen Dingen und ihren Interaktionen als absolut, ewig, überall gleich und gleichförmig fließend angenommen. Ebenso ist der Raum absolut und unabhängig von allen Dingen; er ist

sozusagen eine „Schachtel“, in der etwas ist oder auch nichts ist. Dies gestattet Newton, eine absolute Bewegung und damit Trägheitsbewegung ohne Rücksicht auf spezielle Bezugssysteme annehmen zu können.⁸⁹

⁸⁶ Isaac Newton, Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica, London 1687 digitalisiert <https://gdz.sub.uni-goettingen.de/id/PPN512261393?ify=%7B%22pages%22:%5B35%5D%7D>

⁸⁷ Dies wurde als Gottesbeweis gedeutet.

⁸⁸ Newton, Principia, Scholion, zitiert nach der deutschen Übersetzung, S. 25. Isaac Newton. Mathematische Prinzipien der Naturlehre. Unveränderter fotomechanischer Nachdruck der Ausgabe Robert Oppenheim, Berlin, 1872. Mit Bemerkungen und Erläuterungen herausgegeben von Joseph Philipp Wolfers, Darmstadt, Wissenschaftliche Buchgesellschaft, 1963.

⁸⁹ Dies war nicht unbedingt die vorherrschende philosophische Meinung, aber der Erfolg gab ihm recht. Er selbst litt aus religiösen Gründen durchaus darunter, dass es keinen absoluten, gottgegebenen Punkt im Raum in seiner Theorie gab. Er schloss sich aber bedenkenlos der Meinung von Aristoteles an, dass zwischen zwei Ereignissen die Zeit eindeutig bestimmbar ist.

Der Vorteil liegt einfach in seiner Praktikabilität und wird mit einigen Nachteilen erkaufte: Der newtonsche Raum ist nicht wahrnehmbar und in einem relationalen Raum geht genau diese Praktikabilität verloren. Raum ist bei Newton nicht mehr weiter zerlegbar und somit elementar, also weiterer, differenzierter Erklärung nicht zugänglich.

Newton hat sich intensive Gedanken in seinem Scholium über Raum, Zeit, Ort und Bewegung bereits in der ersten Principia-Ausgabe von 1687 gemacht und sicherlich auch die Widersprüche und Vereinfachungen erkannt.



Abb. 11: Isaac Newton
porträtiert von Godfrey Kneller,
London 1702

Leibniz kritisierte Newtons absolute Zeit und absoluten Raum in Briefen an Samuel Clarke, den von Weizsäcker „als Sprachrohr Newtons“ einstuft.⁹⁰

Leibniz sieht Raum eher als ein Ordnungsprinzip, das der Mensch sich von den Relationen zwischen den Körpern macht. Raum ist ein „Ordnungsprinzip des Nebeneinanders“ und Zeit ein „Ordnungsprinzip des Nacheinanders“. Nur die Relationen zwischen Ereignissen sind relevant.^{91,92} Die Gründe im Briefwechsel waren also philosophischer Art und das, was wir heute „Symmetrie der Ortsinvarianz“ nennen würden.

Hier macht ein kurzer Einschub Sinn: Naturgesetze müssen invariant gegenüber

Änderungen des Ortes, der Zeit und der Richtung sein. Aus dieser Prämisse heraus leitete Emmy Noether die fundamentalen Grundgesetze Energieerhaltung, Impulserhaltung und Drehimpulserhaltung ab. Das Noether-Theorem offenbart für die klassische Physik der kontinuierlichen Prozesse einen tiefen Zusammenhang zwischen diesen Symmetrien in Raum und Zeit

⁹⁰ Von Weizsäcker, Große Physiker, ebenda, S. 176

⁹¹ Zwischen November 1715 und Oktober 1716 fand ein Briefwechsel zwischen Leibniz und dem anglikanischen Theologen und Philosophen Samuel Clarke (1675–1729) statt. Beide Kontrahenten adressierten ihre Briefe jeweils an die Prinzessin von Wales, Caroline von Brandenburg-Ansbach (1683–1737), die eine gute Freundin von Leibniz war.

⁹² Siehe dazu Thomas Filk, Modelle von Raum und Zeit, Skript zur Vorlesung, Wintersemester 2010/11 an der Universität Freiburg (Version vom 21. Dezember 2011), http://www.mathphys.uni-freiburg.de/physik/filk/public_html/Skripte/Texte/Raumzeit.pdf

und den Erhaltungsgrößen.⁹³ Für diskrete Symmetrien gilt es nicht. Im Bereich der Quantenphysik ist mit dem Standardmodell der Teilchenphysik ein in sich geschlossener, symmetrischer Komplex entstanden. Symmetrie heißt in diesem Zusammenhang, dass es eine Anzahl an Transformationen gibt, dass der das System bestimmende Operator („Rechenvorschrift“) invariant bleibt. Der Operator ist die eigentliche mathematische Erhaltungsgröße. Die Symmetrie bezieht sich auf C wie charge, also Invarianz bzgl. Ladungsumkehr (Ladungskonjugation), P wie Parität, also invariant bzgl. räumlicher Spiegelung und T wie time, also Invarianz bzgl. Zeitumkehr. Die meisten elementaren Prozesse sind T-invariant. Mathematisch bedeutet es, dass ein plausibler



Abb. 12: Gottfried Wilhelm Leibniz (Gemälde von Andreas Scheits, etwa 1710)

Vorgang auch dann entsteht, wenn man das Vorzeichen der Zeit ändert, sie „rückwärts laufen“ lässt. Erst auf makroskopischer Ebene, wenn die Entropie bzw. wenn die Dekohärenz als Ergebnis des Kollapses der Wellenfunktionen ins Spiel kommt, entsteht der Zeitpfeil. Erst dann macht die Unterscheidung zwischen Vergangenheit und Zukunft Sinn. Allerdings gibt es auch bei der T-Symmetrie erste subtile Experimente, die unter bestimmten seltenen Umständen einen Symmetriebruch auf der Quantenebene zeigen.⁹⁴ Spektakulär ist auch eine CP-Verletzung im Standardmodell, die einen Unterschied zwischen Materie und Antimaterie offenbart.⁹⁵

Leibniz hat das, was wir heute Symmetrien in der Physik nennen, zumindest philosophisch vorweggenommen und deshalb einen relationalen Ansatz favorisiert. Newton betrachtet den Raum als „sensorium dei“. Für Leibniz sind nur Ereignisse wahrnehmbar, nicht Raum oder Zeit. In seinen „Vernunftprinzipien der Natur“ vertritt er einen strengen Determinismus. Nichts geschieht in der Natur ohne „zureichenden Grund“. Ein weiterer Grundkonflikt mit Clarke/Newton ist sein Prinzip der „Identität des Ununterscheidbaren“ bei Zeit und Raum, worauf

⁹³ Einstein schrieb 1935 in seinem Nachruf in der New York Times: „Fräulein Noether war das bedeutendste mathematische Talent ... seit die höhere Ausbildung von Frauen begann.“ (Zitiert nach <https://www.weltderphysik.de/thema/symmetrien/kontinuierliche-symmetrien-und-das-noether-theorem/>)

⁹⁴ „Observation of Time Reversal Violation in the B0 Meson System“, J. P. Lees et al.; Physical Review Letters; DOI: 10.1103/PhysRevLett.109.211801

⁹⁵ <https://www.pro-physik.de/restricted-files/108196>

Clarke/Newton entgegen, unterschiedliche Orte oder unterschiedliche Zeiten seien unterscheidbar.

Vor dem Hintergrund der gewaltigen Leistung, die Newton mit der „Principia“ geschaffen hat, hat sich die Vorstellung von absoluter Zeit und absolutem Raum mehr als 200 Jahre gehalten. Erst Immanuel Kant hat sich stärker an Leibniz orientiert.⁹⁶ Die Widersprüche liegen jedoch tiefer. Newtons Theorie setzt voraus, dass sich Licht und Gravitationskraft sofort, also unendlich schnell ausbreiten. Man tut Newton übrigens unrecht, wenn man ihm unterstellt, er habe das nicht erkannt. Er hat sich oft gegen das Prinzip einer Fernwirkung ausgesprochen, sie aber als Mittel zur Beschreibung der Gravitation akzeptiert. Bekannt ist folgendes Zitat:

*That one body may act upon another at a distance through a vacuum, without the mediation of any thing else, by and through which their action and force may be conveyed from one to another, is to me so great an absurdity, that I believe no man, who has in philosophical matters a competent faculty of thinking, can ever fall into it.*⁹⁷

Zumindest das Licht musste aber eine endliche Geschwindigkeit haben. Erste Indizien dafür lieferten die Jupitermonde, die umso früher abgedeckt wurden, wenn sich Jupiter in Erdnähe befand. Dies erkannte erstmals 1676 der Däne Ole Christensen Rømer. Christiaan Huygens schätzte die Lichtgeschwindigkeit auf 212.000 km/s ab – eine enorme Leistung. Eine tiefe Erschütterung der newtonschen Lehrmeinung lieferte erst James Clerk Maxwell (1831-1879) mit seiner epochalen Theorie der elektromagnetischen Kräfte, Felder und Wellen. Das elektromagnetische Feld breitet sich wellenförmig und mit konstanter Geschwindigkeit, eben der Lichtgeschwindigkeit, aus. Das mechanische Weltbild der newtonschen Lehrmeinung wurde dadurch in den Fundamenten erschüttert. Der „gottgegebene“ Punkt, auf den sich alle Beobachter als Bezugspunkt einigen können, gibt es offenbar nicht. Diesen Widerspruch löste erst Einstein auf.

⁹⁶ *Wenn aber ich selbst oder ein anderes Wesen mich, ohne diese Bedingung der Sinnlichkeit, anschauen könnte, so würden eben dieselben Bestimmungen, die wir uns jetzt als Veränderungen vorstellen, eine Erkenntnis geben, in welcher die Vorstellung der Zeit, mithin auch der Veränderung gar nicht vorkäme.* (Kritik der reinen Vernunft, 2. Aufl. 1787, S. 54, zitiert nach <https://www.projekt-gutenberg.org/kant/krva/krva016.html>)

⁹⁷ <http://www.newtonproject.ox.ac.uk/view/texts/normalized/THEM00258>

Original letter from Isaac Newton to Richard Bentley

Source: 189.R.4.47, ff. 7-8, Trinity College Library, Cambridge, UK

Zeit und Raum bei Einstein

Im Nachhinein bezeichnet man die Jahre 1665 bis 1666, als annus mirabilis von Isaac Newton. Er war vor der Pest zurück in seinen Heimatort Woolsthorpe-by-Colsterworth geflüchtet und entwickelte in diesen beiden Jahren die klassische Mechanik und machte revolutionäre Entdeckungen in der Infinitesimalrechnung, Bewegungslehre, Optik und Gravitation. Das Jahr 1905 gilt als Einsteins annus mirabilis. Fünf bahnbrechende Entdeckungen hat er praktisch im Alleingang in diesem Jahr veröffentlicht bzw. in seiner Dissertation vorgelegt.⁹⁸ Angeregt wurde er durch die Lektüre eines Buches von Henri Poincaré, das drei ungelöste Probleme ansprach, die Einstein in diesem Jahr löste.⁹⁹

Hier soll vor allem der Artikel „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“ von Bedeutung für den vorliegenden Beitrag sein, weil er unter dem Titel „Spezielle Relativitätstheorie“ Wissenschaftsgeschichte schrieb und die Begriffe Raum und Zeit revolutionierte. Einen Tag nach seinem Erscheinen reichte Einstein eine Ergänzung ein: „Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?“ Diese Publikation enthält die wohl berühmteste Formel der Wissenschaftsgeschichte $E=m \cdot c^2$.

Einstein war durchaus vorbereitet auf diese Forschungen. Mitte bis Ende des 19. Jahrhunderts hatten große Naturphilosophen, wie Ernst Mach, Newtons Haltung vehementer kritisiert. Ernst Mach war dabei eine Leitfigur für Albert Einstein.¹⁰⁰ Mach gilt als einer der Mitbegründer des Empirismus. Er war der positivistischen Ansicht, dass die Physik nur prinzipiell beobachtbare Größen berücksichtigen sollte. Deshalb lehnte er auch anfangs die Atomtheorie ab. Mach schickte dem jungen außerordentlichen Professor nach Zürich eine Arbeit und Einstein dankte ihm mit der Bemerkung, dass er sich freue, „*dass Sie Vergnügen an der Relativitätstheorie haben.*“ Er unterzeichnete ungewöhnlich

⁹⁸ Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt. In: Annalen der Physik, 17 (6), S. 132-148

Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen. In: Annalen der Physik. 17 (8), S. 549-560

Zur Elektrodynamik bewegter Körper. In: Annalen der Physik 17 (10), 891-921

Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig? In: Annalen der Physik, 18 (13), S. 639–641 (Äquivalenz von Masse und Energie).

Der fünfte Beitrag ist seine Dissertation, vorgelegt am 30. April der Universität Zürich: Eine neue Bestimmung der Moleküldimensionen

⁹⁹ Jim Holt; Als Einstein und Gödel spazieren gingen, Rowohlt April 2020, S. 18

¹⁰⁰ Karl Popper schrieb: Nur wenige Männer haben auf die geistige Entwicklung des 20. Jahrhunderts einen ähnlich großen Einfluss gehabt wie Ernst Mach. ... Er beeinflusste Albert Einstein, Niels Bohr, Werner Heisenberg, William James, Bertrand Russell-um nur einige zu nennen. Zitiert nach Karl Sigmund, Sie nannten sich der Wiener Kreis, S. 19 ff

als „Ihr Sie verehrender Schüler“.^{101,102} Die Spezielle Relativitätstheorie und 10 Jahre später die Allgemeine Relativitätstheorie mit ihren Implikationen und Voraussagen gilt als sein Hauptwerk. Man sollte aber nicht vergessen, dass er gerade in der ersten Phase der Entstehung der zweiten großen Theorie des 20. Jahrhunderts, der Quantenmechanik, wesentliche Beiträge dazu lieferte und nicht für die Relativitätstheorie, sondern für die Entdeckung des photoelektrischen Effekts, also einem quantenmechanischen Thema, den Nobelpreis für Physik erhalten hatte.

Einsteins wissenschaftliche Karriere begann weitgehend außerhalb des etablierten Wissenschaftsbetriebes. Auf Vermittlung seines Freundes Marcel Grossmann bekam er im Juni 1902 eine feste Anstellung als technischer Experte dritter Klasse am Patentamt in Bern („Eidgenössische Institut für Geistiges Eigentum“).

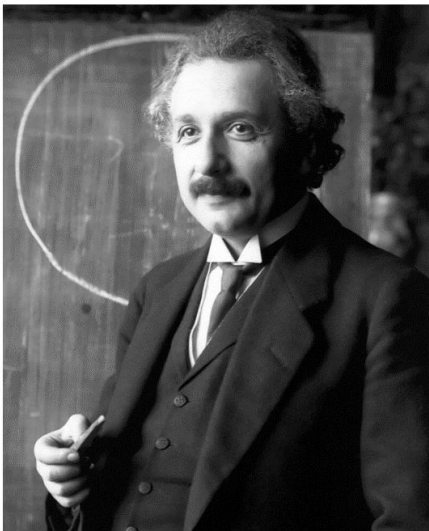


Abb. 13: Albert Einstein, 1921

Man kann davon ausgehen, dass er nur eingeschränkter Zugang zur Fachliteratur hatte und kaum wissenschaftliche Diskussionen führen konnte, die über ein regelmäßiges Treffen mit zwei Freunden hinausging („Akademie Olympia“). Er war also weitgehend auf sich selbst gestellt. Erst 1909, nach seiner Habilitation, (die im ersten Anlauf aus formalen Gründen abgelehnt wurde), bekam er eine Dozentenstelle für theoretische Physik an der Universität Zürich. Erst dann war er im Wissenschaftsbetrieb angekommen.¹⁰³

Eine zentrale Hypothese beherrschte die damalige wissenschaftliche Diskussion bzgl. der Ausbreitung von Lichtwellen. Man nahm an, dass der Raum mit einem „Äther“ genannten Stoff erfüllt ist, der, ähnlich wie das Wasser bei Wasserwellen oder der Luft bei Schallwellen, Voraussetzung für die Ausbreitung des Lichts ist. Allerdings gibt es einen wichtigen Unterschied. In Wasser und Luft existieren Longitudinalschwingungen in der Ausbreitungsrichtung. Thomas Young (1773-1827) und genauer Augustin-Jean Fresnel (1788-1827) zeigten, dass sich Licht als Transversalwelle, senkrecht zur Ausbreitungsrichtung ausbreitet. Beide

¹⁰¹ Einstein an E. Mach, 17. August 1909, zitiert nach Albrecht Fölsing; Albert Einstein – Eine Biographie, S. 536

¹⁰² Siehe auch <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/machsches-prinzip/9262>. Der Begriff wurde von Einstein geprägt.

¹⁰³ Quelle der Abbildung: https://de.wikipedia.org/wiki/Albert_Einstein#/media/Datei:Einstein_1921_portrait2.jpg

Schwingungen kennt man von Festkörpern, z.B. bei Erdbeben, weil eine Bindung zwischen den Molekülen bestehen muss, um so schwingen zu können. Dem Äther mussten also seltsame Eigenschaften zugeschrieben werden und er sollte durch seine elastische Deformation trotz der verlangten Steifigkeit für Transversalwellen die Fernwirkung der Kräfte auf Nahwirkung zurückführen.¹⁰⁴ Der hypothetische, im Himmel und auf Erden, überall wo Licht sich ausbreiten konnte, allgegenwärtige „Äther“ definierte also geradezu den absoluten Raum und die absolute Zeit. Obwohl Einstein in seiner Abhandlung „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“ Bezug nimmt auf „... die misslungenen Versuche, eine Bewegung der Erde relativ zum „Lichtmedium“ zu konstatieren ...“, scheint er den wichtigsten Versuch, laut Argumenten des Biografen Albrecht Fölsing, nicht zu kennen – das Michelson-Morley-Experiment von 1887.^{105,106} Dies kann durchaus bezweifelt werden. Der niederländische Physiker Hendrik Antoon Lorentz hat mit seinen Untersuchungen zur Elektrodynamik bewegter Körper erste wichtige Grundlagen für die spezielle Relativitätstheorie gelegt und für das Ergebnis von Michelson-Morley keine Erklärung gehabt. Das war allgemein bekannt. Dieses Experiment ist keinesfalls gescheitert, hat es doch mit der heute noch verwendeten Messmethode der Interferenz mit großer Genauigkeit nachgewiesen, dass die Lichtgeschwindigkeit in allen Richtungen gleich ist und zwar unabhängig vom Bewegungszustand der Lichtquelle.

Insoweit stimmt Einsteins Satz trotzdem. Genau dieses Postulat, eine universale Geschwindigkeit elektromagnetischer Wellen inkl. des Lichts (im Vakuum) war die eine Voraussetzung, die Einstein für seine Schlussfolgerungen benötigte. Die zweite Annahme nennt er sein „Prinzip der Relativität“, dass für alle Inertialsysteme¹⁰⁷, für die die mechanischen Gesetze Newtons gelten, auch die maxwellschen Gesetze der Elektrodynamik und Optik gelten. Mathematische Grundlagen hatten Lorentz und Poincaré gelegt.¹⁰⁸ Doch

¹⁰⁴ Filk, Giulini, ebenda, S. 129

¹⁰⁵ Albrecht Fölsing, Albert Einstein, S. 77

¹⁰⁶ Neffe formuliert es indifferenter. Siehe Jürgen Neffe, Einstein, rororo, 4. Auflage, Reinbek bei Hamburg, Juli 2009, S. 151

¹⁰⁷ Von lateinisch inertia, die „Trägheit“, ein kräftefreier Körper verharrt in Ruhe oder bewegt sich gleichförmig und geradlinig relativ zu diesem „Bezugssystem“.

Definition siehe <https://www.spektrum.de/lexikon/astronomie/inertialsystem/196>

Ein Bezugssystem hat lediglich einen Bezugspunkt und drei orthogonale Richtungen mit einem Maßstab sowie einer Uhr. Ein Inertialsystem benötigt man, wenn Abstände zwischen Körpern im Raum miteinander verglichen werden sollen und zwar zu gleichen Zeiten.

¹⁰⁸ Heute werden drei Arbeiten als Geburtsstunde der Speziellen Relativitätstheorie genannt: H.A. Lorentz; Electromagnetic phenomena in a system moving with any velocity smaller than that of light, Eingereicht am 27.5.1904,

Lorentz hält an der nicht beobachtbaren Ätherhypothese fest. Der entscheidende Schritt von Einstein besteht in einer neuen Sichtweise auf Raum und Zeit. Der abstrakte Begriff „Raum“ wurde zum konkreten „Längenmaßstab“ und „Zeit“ bedeutet eigentlich „Uhr“. Es geht ihm also nur um prinzipiell beobachtbare Fakten. Ernst Mach war ein Verfechter von „Ockhams Messer“; Wilhelm von Ockham (1285-1349) hat dieses Prinzip erstmals formuliert und Einstein hat es konsequent, fast brutal, angewendet. Es sei darauf verwiesen: Auch die Spezielle Relativitätstheorie berücksichtigt einen „absoluten“ Hintergrund, in dem die Ereignisse der Raumzeit stattfinden. In Inertialsystemen gilt der geradlinig-gleichförmige Verlauf der Bewegung ohne Krafteinwirkung.

Bei jedem Ereignis gibt es eine starre Struktur, nämlich den doppelten Lichtkegel, mit dem die Ereignisse der „Raum-Zeit“ in kausal zukünftige, kausal vergangene und raumartige Ereignisse eingeteilt werden.

Absolute Ruhe gibt es also weder in der Mechanik noch in der Elektrodynamik und Optik. Zeit und Raum müssen „relativiert“ werden. Orts- und Zeitangaben sind abhängig vom jeweiligen Inertialsystem und dort abhängig von der Geschwindigkeit relativ zur immer konstanten Lichtgeschwindigkeit. Gleichzeitigkeit ist nur bei den relativ kleinen Geschwindigkeiten auf der Erde als Näherungswert zu akzeptieren. Die sogenannte Spezielle Relativitätstheorie berücksichtigt die ruhende oder gleichförmige, nicht beschleunigte Bewegung zueinander in den einzelnen Inertialsystemen. Für alle Beobachter in Bewegung zueinander, sind die elementaren Naturgesetze gleich. Kein Inertialsystem ist bevorzugt. Die Zeit verläuft für einen relativ schneller bewegten Beobachter langsamer als für einen relativ dazu langsameren oder ruhenden Beobachter. Man sollte nicht vergessen: Die Längen im schneller bewegten System verkürzen sich und dessen Masse bzw. Impuls vergrößert sich. Die Lichtgeschwindigkeit kann nie erreicht werden, da dann die Länge gegen Null geht und die Masse gegen unendlich. Zur Beschleunigung einer Masse ist Energie erforderlich, so dass sich aus dieser Abhängigkeit die berühmte Formel $E=m \cdot c^2$ ableiten lässt.

Der Aufsatz „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“ markiert zwar meist die Geburtsstunde der Speziellen Relativitätstheorie, die Einstein zugeschrieben wird. Doch die weitere exakte mathematische Ausarbeitung erfolgte durch Hermann Minkowski aus Göttingen. Göttingen war in den ersten 30 Jahren des 20. Jahrhunderts das Mekka der internationalen Mathematiker und theoretischen Physiker, rund um den wohl berühmtesten Mathematiker des

J.H. Poincaré; Sur la dynamique de l'électron, eingereicht bei der Französischen Akademie der Wissenschaften am 5.6.1905,

A. Einstein; Zur Elektrodynamik bewegter Körper, eingereicht am 30.6.1905

Jahrhunderts, David Hilbert. Minkowski und Hilbert hatten sich in Königsberg kennen gelernt und waren ein Leben lang befreundet. Eine Zwischenstation in Minkowskis Karriere war das Polytechnikum in Zürich, wo Einstein ein eher undisziplinierter Schüler von ihm war („fauler Hund“). Einstein arbeitete lieber autodidaktisch und schwänzte offenbar öfters die Vorlesung. Hilbert ging 1895 nach Göttingen und zog den brillianten Minkowski 1902 ebenfalls als Ordinarius nach.

Minkowski erkannte das Potential des Aufsatzes und die für ihn erstaunliche Entwicklung von Einstein, betrachtete die Publikation aber als „geniales

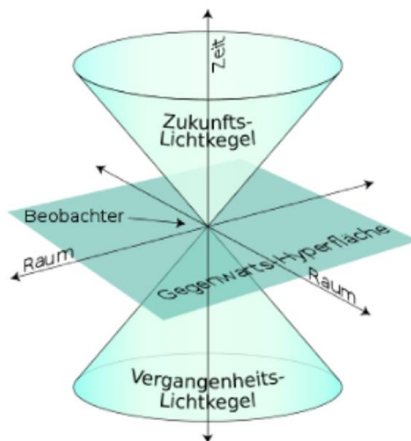


Abb. 14: Der Doppellichtkegel im 4-dimensionalen Minkowski-Raum

Durcheinander“, das nach einer ordnenden Hand schrie. Er erkannte, dass die Arbeiten von Einstein und vorher von Hendrik Antoon Lorentz oder Henri Poincaré mathematisch in einem nichteuklidischen Raum, der Raumzeit-Metrik, beschrieben werden können. Die Raumzeit-Metrik bildet die sogenannte Minkowski-Geometrie. Jeder Beobachter in Punkt B in der Gegenwart hat seine Eigenzeit und die zentrale Frage ist, was konnte B in der Vergangenheit oder kann ihn in der Zukunft beeinflussen. Da die Lichtgeschwindigkeit kausale Implikationen, also Ursache/Wirkung-Zusammenhänge, begrenzt, liegt in jedem Punkt B die potentielle Zukunft in einem

zeitartigen Lichtkegel beginnend bei B und die potentielle Vergangenheit in einem entgegengesetzten Kegel endend bei B.¹⁰⁹ Einfache Beziehungen in der euklidischen Geometrie, wie z.B. der Abstandsbegriff, sind in dieser Geometrie deutlich komplexer. Erhalten bleibt aber die Invarianz gegenüber Koordinatentransformationen.¹¹⁰

Die mathematischen Zusammenhänge arbeitete Minkowski in drei Jahren aus. Das Ergebnis trug er auf einer Konferenz der Naturforscher in Köln im September 1908 vor. Dort fiel auch der berühmte Satz: „*Von Stund' an sollen*

¹⁰⁹ Quelle der Grafik: <https://de.wikipedia.org/wiki/Lichtkegel>

¹¹⁰ Zur Mathematik der Minkowski-Geometrie siehe z.B.

<https://homepage.univie.ac.at/franz.embacher/SRT/Geometrie.html>

Weitere historische Fakten siehe Georg von Wallwitz; *Meine Herren, dies ist keine Badeanstalt*, Berenberg, Berlin, 5. Auflage, Feb. 2019, S. 78 ff

*Raum für sich und Zeit für sich völlig zu Schatten herabsinken und nur noch eine Art Union der beiden soll Selbständigkeit bewahren.*¹¹¹

1907 begann Einstein an der Arbeit, die auch nicht gleichförmige, also beschleunigte Bewegung einbeziehen sollte. In einem „Geistesblitz“, den Einstein als „den glücklichsten Gedanken meines Lebens“¹¹² bezeichnet hat, realisiert er, dass träge und schwere Masse gleich behandelt werden können. Er schreibt: *Trägheit und Schwere sind wesensgleich.*^{113,114} Es war ein Meilenstein, um die Gravitationsgesetze von Newton zu einer Allgemeinen Relativitätstheorie der Gravitation so ersetzen zu können, dass die Ergebnisse von Newton als erste Näherung enthalten sind. Experimentell kann man nur überprüfen, dass träge und schwere Masse zueinander proportional sind. Das Gleichheitszeichen ist eine Frage der Konvention. Man wählt die newtonsche Konstante bzw. die Erdbeschleunigung so, dass der Proportionalitätsfaktor eins wird. Diese Äquivalenzbeziehung wurde mittlerweile experimentell mit einer Genauigkeit von 10^{-11} bis 10^{-12} bestätigt.

Der Weg zu einer konsistenten mathematischen Formulierung war mühsam und auch voller verständlicher Irrtümer bei diesem extrem anspruchsvollen Vorhaben. Bereits 1907 hatte Einstein am „Schönheitsfehler“, die Newtons Gravitationstheorie nicht erklären konnte, dem Merkur-Perihel, „herumgerechnet“.^{115,116} Bereits deutlich vor 1915 hatte er Gleichungen

¹¹¹ Zitiert nach Von Wallwitz, Meine Herren, dies ist keine Badeanstalt, Berenberg, Berlin, 5. Auflage, Feb. 2019, S. 93

¹¹² Grundgedanken und Methoden der Relativitätstheorie in ihrer Entwicklung dargestellt. Pierpont Morgan Library, New York, unpubl. Manuskript, zit. n. A. Pais: Raffiniert ist der Herrgott. Heidelberg, 1998, S. 175

¹¹³ Albert Einstein; Prinzipielles zur Allgemeinen Relativitätstheorie; Annalen der Physik 55, (1918) 241

¹¹⁴ Dies ist nicht selbstverständlich. Heinrich Hertz schrieb bereits 1884 in einem Vorlesungsskript, das in Buchform erschienen ist: *Diese Übereinstimmung ist also ein wunderbares Rätsel zu bezeichnen, sie bedarf einer Erklärung...* zitiert nach Filk, Giuliani, ebenda, S. 203

¹¹⁵ Brief von Einstein an Conrad Habicht vom 24.12.1907, zitiert bei Albrecht Fölsing, Albert Einstein, S. 348

¹¹⁶ Siehe z.B. <https://www.spektrum.de/frage/was-hat-das-merkur-perihel-mit-einstein-zu-tun/1478819>: Merkur „bewegt sich auf einer stark elliptischen Bahn um die Sonne. Dabei verschiebt sich sein sonnennächster Punkt bei jedem Umlauf ein Stück weiter um das Zentrum unseres Sonnensystems. Gemäß der klassischen Gravitationstheorie sollte diese Periheldrehung auf Grund der Anziehungskräfte der anderen Planeten 5,3 Bogensekunden pro Jahr betragen – das entspricht ungefähr dem 660. Teil eines Grads. Genaue Messungen ab Mitte des 19. Jahrhunderts ergaben dann jedoch den etwas größeren Wert von 5,7 Bogensekunden pro Jahr. Der Unterschied von 0,4 Bogensekunden pro Jahr zwischen Vorhersage und Beobachtungen ließ sich mit dem klassischen Modell nicht erklären – und diente später als Motivation für Einsteins allgemeine Relativitätstheorie.“

gefunden, die sehr nahe an der Lösung waren. Aber er konnte entweder das Newtonsche Gravitationsgesetz nicht als erste Näherung daraus ableiten oder den Merkur-Perihel nicht korrekt daraus berechnen. Er hat aber trotz vielfältiger Korrespondenz darüber Stillschweigen bewahrt. Ein konkreter Hinweis auf diese Berechnungen findet sich in einem Brief an Sommerfeld vom 28. November 1915; da war aber der Durchbruch durch die Publikation in den Sitzungsberichten der Preußischen Akademie der Wissenschaften von gerade einmal dreieinhalb Seiten unter dem Titel „Die Feldgleichungen der Gravitation“ bereits gelungen.¹¹⁷ Für die Plenarsitzung der Preußischen Akademie am 4. November 1915 hat er zu Beginn ein so beispielloses Resümee seiner Fehler und Irrwege gezogen, wie man es in diesen heiligen Hallen wohl noch nie gehört hatte.¹¹⁸

Doch Einstein rang nicht allein im Herbst 1915 um eine endgültige mathematische Fassung der Theorie, sondern auch David Hilbert.

Zu den wissenschaftlichen Höhepunkten in Göttingen gehörten die sogenannten Wolfskehl-Vorlesungen. Nicht nur hochkarätige Vortragende, sondern ein erlesenes Auditorium mit vielen späteren Nobelpreisträgern zeichneten die jährliche Veranstaltung aus. Einstein wurde von Hilbert für den Sommer 1915 eingeladen. Einstein hatte in einem Hochgefühl zugesagt, denn er war sich sicher, die Gravitationsgleichungen zu diesem Zeitpunkt gefunden zu haben. Er hielt in der Veranstaltungswoche sechs zweistündige Vorlesungen und verbrachte fast jede Minute von morgens bis abends mit Hilbert. Mit fortgeschrittener Diskussion kamen doch Zweifel an der exakten mathematischen Formulierung auf. Dies gilt im Laufe des Herbstes für beide. Unabhängig (und doch wieder nicht) arbeiteten sie an einer Verbesserung, fanden sie auch praktisch zeitgleich und berichteten das Ergebnis an ihre Akademien in Göttingen und Berlin. Allerdings waren beiden zunächst die unterschiedlichen Zielsetzungen nicht klar. Hilbert kam von der Mathematik und seinem großen Vorhaben. Er wollte ihre vollständige Axiomatisierung, also aufgebaut von möglichst wenigen Axiomen. Das sollte durchaus in die (theoretische) Physik hineinreichen, mit dem Ziel hin zu einer, wie wir heute sagen würden, „Theorie of Everything“. Ansonsten war ihm Physik mehr oder weniger fremd. Er wandte sich auch nach diesem Zwischenspiel wieder der reinen Mathematik zu.

Einstein hingegen hatte mit seiner genialen physikalischen Intuition den richtigen Weg eingeschlagen und musste „nur“ die korrekte mathematische Formulierung finden. Es kam zu einem relativ kurzen, eifersüchtigen Prioritätenstreit, der aber nicht an die breite wissenschaftliche Öffentlichkeit

¹¹⁷ Siehe Albrecht Fölsing, Albert Einstein, S. 416

¹¹⁸ Siehe Albrecht Fölsing, Albert Einstein, S. 417

drang. Hilbert hat dann am 23.12.1916 der Akademie in Göttingen in einem Papier deutlich gemacht, dass er Einstein als Entdecker der Allgemeinen Relativitätstheorie anerkennt.¹¹⁹

Der Weg zu einer konsistenten mathematischen Beschreibung war nicht nur mühsam, sondern damals auch noch für Physiker eher mathematisches Neuland,¹²⁰ obwohl die verwendete nicht-euklidische Geometrie bereits im 19. Jahrhundert durch Bernhard Riemann entwickelt wurde. Dieser hatte in seinem Habilitationsvortrag am 10. Juni 1854 in Göttingen mit dem Titel „Über die Hypothesen, welche der Geometrie zugrunde liegen“ die nichteuklidische Geometrie begründet. Wesentliche Vorarbeiten leisteten unabhängig voneinander Carl Friedrich Gauß (1777–1855, der sie transzendent nannte), Janos Bolyai (1802–1860, der Sohn eines Jugendfreundes von Gauß) und Nikolai Iwanowitsch Lobatschewski (1792–1856). Abgeschlossen wurden die Arbeiten von David Hilbert (1862–1943) im Jahre 1899. Nach Euklid war der Raum „flach“, hatte drei Dimensionen und Parallelen schneiden sich nie. Dies wurde von großen Philosophen, wie Aristoteles, Ptolemäus, Galilei oder Leibniz über zwei Jahrtausende bestätigt. Nach Riemann konnte ein Raum beliebig viele Dimensionen haben. Das Parallelenaxiom entfiel für diese nichteuklidischen Räume. Die Krümmung wurde in jedem Punkt durch einen Satz an Werten, Tensor genannt, definiert. Riemann systematisierte den Formalismus. Im sphärischen Fall ist die Krümmung konstant positiv, im hyperbolischen Fall konstant negativ. Einfaches Anwendungsbeispiel ist die Winkelsumme eines Dreiecks auf einer Kugel ($>180^\circ$), auf einer Sattelfläche ($<180^\circ$) oder einem ebenen Blatt Papier ($=180^\circ$).

Die auf die Physik angewendete Mathematik ist anspruchsvoll, weil gegenseitige Abhängigkeiten zwischen Materie (oder gravitativ wirkender Strahlung) und der Geometrie des Raumes bestehen. Es wurden deshalb schnell Beiträge verfasst, die eine bessere Übersicht über die allgemeine Relativitätstheorie ermöglichen sollten. Einer der ersten war Max Born.¹²¹ Einstein selbst versuchte sich unter dem Titel „Über die spezielle und die

¹¹⁹ Georg von Wallwitz, ebenda, S. 112-122

¹²⁰ David Hilbert in Göttingen perfektionierte diesen Zweig der Mathematik und war ebenfalls aus mathematischer Sicht nahe an der Lösung. Es kam hinter den Kulissen zur Verstimmung, die aber ebenfalls in aller Stille beigelegt wurde. Hilbert erkannte die Priorität von Einstein uneingeschränkt an. Siehe Albrecht Fölsing, Einstein, S. 422

¹²¹ Max Born, Einsteins Theorie der Gravitation und der allgemeinen Relativität, in Physikalische Zeitschrift, 17, 1916, S.51-59

allgemeine Relativitätstheorie, allgemeinverständlich“.¹²² Einstein meinte, es könne auch „*gemein unverständlich*“ heißen.^{123,124}

John Archibald Wheeler hat diese gegenseitigen Abhängigkeiten so formuliert:

Matter tells space how to curve.

*Space tells matter how to move.*¹²⁵

Die Konsequenz aus der neuen Gravitationstheorie für das Licht kann sehr plakativ zweifach interpretiert werden. Gravitationsfelder reduzieren die Lichtgeschwindigkeit und machen sie variabel oder, die allgemein favorisierte Interpretation, der Raum wird gekrümmt und Lichtstrahlen nehmen nicht den geradlinigen Weg wie in einer euklidischen Geometrie, sondern werden gekrümmt. Die Lichtgeschwindigkeit bleibt als universelle Konstante immer gleich.

Die Raumkrümmung ist insbesondere während einer Sonnenfinsternis beobachtbar, weil Sterne, die nahe an der Position der Sonne stehen, eine scheinbare Abweichung ihrer Position durch die gekrümmten Lichtstrahlen erfahren. Sollte die Masse der Sonne die Raumzeit verbiegen, müsste ein knapp vorbeifliegender Lichtstrahl eine „leichte Kurve“ machen. Die Ablenkung wäre nur knapp 1,8 Bogensekunden, also ein Zweitausendstel Grad, was der Breite einer Euro-Münze entspricht, die man aus mehreren Kilometern Abstand sieht.¹²⁶ Dieser Effekt wurde auf einer Expedition, geleitet von Arthur Stanley Eddington, im Jahr 1919, quantitativ korrekt beobachtet und führte zur sensationellen Bestätigung der neuen Theorie. Es war der Beginn einer beispiellosen Berühmtheit von Einstein auch außerhalb der Naturwissenschaften. Lichtablenkung ist übrigens hier ein unglücklicher Begriff. Licht breitet sich dann gerade aus, wenn der Raum euklidisch flach ist. Das ist er in sehr guter Näherung auf der relativ kleinen Erde. In der Nähe einer schweren Masse wie der Sonne gehorcht die Raumgeometrie eben nicht mehr der euklidischen Geometrie, sondern es muss für die Lichtausbreitung die Plancksche Geometrie an dieser Stelle zugrunde gelegt werden. Die Krümmung

¹²² Verlag Vieweg, Braunschweig, 1917

¹²³ Zitiert nach Albrecht Fölsing, Albert Einstein, S. 425

¹²⁴ Es fällt schwer, an dieser Stelle unpolitisch zu bleiben. Die Relativitätstheorie galt als Jüdische Wissenschaft, Einstein als „Undeutscher“. Nach dem Mord am deutschen Außenminister W. Rathenau musste Einstein den Hauptvortrag zum 100. Jahrestreffen der Gesellschaft Deutscher Naturforscher und Ärzte 1922 vorsichtshalber absagen. Siehe dazu Karl Sigmund; Sie nannten sich der Wiener Kreis, S. 101

¹²⁵ Das Zitat ist im 1973 erschienen Standardwerk *Gravitation*, von Charles W. Misner, Kip S. Thorne and John A. Wheeler, S. 5, zu finden. Siehe auch [https://en.wikipedia.org/wiki/Gravitation_\(book\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Gravitation_(book))

¹²⁶ Siehe z.B. <https://www.sueddeutsche.de/wissen/einstein-sonnenfinsternis-relativitaetstheorie-principe-eddington-1.4465884>

ist für alle Frequenzen gleich, unterscheidet sich also von der Lichtbrechung an der Grenzfläche zwischen zwei Medien, z.B. Luft und Wasser, also der Dispersion.

Wo sind nun Gemeinsamkeiten und Unterschiede zur newtonschen Theorie? Auf Bitte der englischen „TIMES“ verfasste Einstein einen Aufsatz, der am 28. November 1919 erscheint. Darin schreibt er zur Abgrenzung:

„Die neue Theorie der Gravitation weicht in prinzipieller Hinsicht von der Theorie Newtons bedeutend ab. Aber ihre praktischen Ergebnisse stimmen mit denen der Newton'schen Theorie so nahe überein, dass es schwerfällt, Unterscheidungskriterien zu finden, die der Erfahrung zugänglich sind. Solche haben sich bis jetzt gefunden

1) in der Drehung der Ellipsen der Planetenbahnen um die Sonne (beim Merkur bestätigt)

2) in der Krümmung der Lichtstrahlen durch die Gravitationsfelder (durch die englischen Sonnenfinsternis-Aufnahmen bestätigt).

3) in einer Verschiebung der Spektrallinien nach dem roten Spektralende hin des von Sternen bedeutender Masse zu uns gesandten Lichtes (bisher nicht bestätigt).

Der Hauptreiz der Theorie liegt in ihrer logischen Geschlossenheit. Wenn eine einzige aus ihr gezogene Konsequenz sich als unzutreffend erweist, muss sie verlassen werden; eine „bloße“ Modifikation erscheint ohne Zerstörung des ganzen Gebäudes unmöglich.“^{127,128}

Die durch die Gravitation hervorgerufene Rotverschiebung in Punkt 3) wurde erstmals 1960 und 1965 beobachtet (Pound-Rebka-Snyder-Experiment). Ein Photon verliert Energie, wenn es ein Gravitationspotential überwindet. Dadurch unterliegt seine Frequenz einer entsprechenden Rotverschiebung. Dieser Effekt wurde mit einer Genauigkeit von $\pm 1\%$ bestätigt.¹²⁹

Was in den von Einstein verfassten Zeilen nicht so deutlich wird, sind begriffliche Unterschiede zur newtonschen Theorie, die an den Grundlagen der klassischen Physik rüttelten. Es beginnt mit der augenblicklichen, also instantanen Fernwirkung der Gravitation bei Newton, obwohl dieser sich nicht an

¹²⁷ Reprinted from: The Collected Papers Of Albert Einstein, Volume 7, The Berlin Years: Writings, 1918–1921, Doc. 25, “What Is the Theory of Relativity?”, (pp. 206–211) http://alberteinstein.info/vufind1/images/einstein/ear01/view/3/CP7Doc25_pp206-211_000016783.pdf

¹²⁸ Punkt 3 ist mittlerweile ebenfalls bestätigt sowie weitere Voraussagen, die Einstein nicht für technisch möglich gehalten hat, z.B. der Nachweis von Gravitationswellen.

¹²⁹ <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/pound-rebka-snyder-experiment/11580>

Spekulationen beteiligen wollte, wie die Gravitation vermittelt wird.¹³⁰ Die Gravitation in der Allgemeinen Relativitätstheorie ist ebenso wie der Elektromagnetismus dagegen eine Nahwirkungstheorie, in der sich keine Wirkung schneller als das Licht ausbreiten kann. Newton tat jedoch zu diesem Zeitpunkt gut daran, sich eine „Bereichsbeschränkung“ aufzuerlegen. Selbst die Spezielle Relativitätstheorie und auch die Quantenmechanik taten dies. Deshalb konnten zunächst gesicherte, isolierte Aussagen getroffen werden ohne sich zu verzetteln.¹³¹

Auch in modernen Experimenten oder Beobachtungen wurde die Spezielle und Allgemeine Relativitätstheorie vielfach bestätigt. Oft wurde das spektakuläre „Zwillingsparadoxon“ nachgewiesen. Wenn sich zwei exakt gleichlaufende Uhren unterschiedlich schnell zueinander durch den Raum bewegen, so werden sie unterschiedliche Zeiten anzeigen. Dieser Effekt ist abhängig von ihrer Bahn durch den Raum.¹³² Als erstes wiesen J.C. Hafele und Richard E. Keating 1971 diese kinetische Zeitdilatation nach. Die gravitative Zeitdilatation wurde 1975 im Maryland Experiment in praktisch exakter Übereinstimmung mit der Theorie gemessen.¹³³

In einem Langzeittest zur Allgemeinen Relativitätstheorie wurde der Doppelpulsar PSR 1913 + 16 beobachtet. Der Pulsar hat einen unsichtbaren Begleiter. Beide umkreisen sich mit einer maximalen Bahngeschwindigkeit von 400 km/s, was einer Bahnperiode von 7,75 h entspricht. Dabei geben sie Energie in Form von Gravitationswellen ab, nähern sich einander an und die Bahnperiode nimmt ab. Die gemessene Änderung entspricht sehr genau den Vorhersagen der Allgemeinen Relativitätstheorie. Dies war die erste indirekte Beobachtung von Gravitationswellen. Der Nobelpreis für Physik 1993 ging für diese Entdeckung an John Hulse und Joseph Taylor.¹³⁴

¹³⁰ Newton sagte dazu den berühmten Satz „*Hypotheses non fingo*“ – Hypothesen mache ich nicht. Er schrieb diese Phrase in dem Essay Scholium Generale, das ein Anhang der 2. Ausgabe (1713) der Principia wurde.

¹³¹ Siehe dazu Rüdiger Vaas, *Jenseits von Einsteins Universum*, Kosmos, S. 103 ff

¹³² Das erste und wohl berühmteste Experiment zur direkten Messung der Zeitdilatation wurde im Herbst 1971 von J.C. Hafele von der Washington University (St. Louis, Missouri) und Richard E. Keating vom U.S. Naval Observatory (Washington D.C.) durchgeführt. Die beiden Forscher haben vier Cäsium-Atomuhren in Linienflügen einmal in westliche Richtung und einmal in östliche Richtung um die Erde transportiert und dabei den Zeitverlauf aufgezeichnet. (<http://www.xn--relativittsprinzip-ttb.info/experimente/hafele-keating.html>)

¹³³ Weitere Beispiele von Gravitationseffekten siehe <http://www.xn--relativittsprinzip-ttb.info/experimente/maryland-experiment.html>

¹³⁴ <https://www.spektrum.de/magazin/nobelpreis-fuer-physik-indirekter-nachweis-von-gravitationswellen/821271>

Am Europäischen Kernforschungszentrum CERN wurden eine Reihe von entsprechenden Experimenten zur Überprüfung der Theorie mit Elementarteilchen gemacht. Die kinetische Zeitdilatation wurde 1977 sehr genau mit schnellen Myonen nachgewiesen.¹³⁵

Mit im Internet käuflichen Uhren lässt sich nachweisen, dass die Uhr im Erdgeschoß eines Hochhauses langsamer läuft, als die identische Uhr in oberen Stockwerken. Mit Spezialuhren ist dies sogar bei einem Höhenunterschied von einem Meter messbar. Der Unterschied beträgt $1,06 \cdot 10^{-16}$ s. Die metrologische Definition der Sekunde bleibt davon unberührt.¹³⁶ Die Sekunde im internationalen Einheitensystem SI ist eine „Eigenzeit-Sekunde“ und hat (fast) keinen Bezug zur Relativitätstheorie¹³⁷. Die Generalkonferenz verlangt aber seit 1997, dass die Definition zur Messung der Sekunde sich auf ein „ruhendes Caesium-Atom bei 0° Kelvin“ bezieht um Effekte aus der Speziellen Relativitätstheorie auszuschließen. Trotzdem besteht Harmonisierungsbedarf durch das Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) in Paris. Aus einer „idealen“ Sekunde, unterschiedlicher Höhe der ca. 250 nationalen Atomuhren (z.B. PTB/Braunschweig 79 m, NIST/Boulder Colorado 1600 m), mittlerer Sonnenzeit und weiteren Aspekten wurde die Universal Coordinated Time UTC begründet. Sie stellt einen Kompromiss der verschiedenen Einflussfaktoren dar und führt, in Absprache mit dem International Earth Rotation Service, das die Erdlage gegenüber dem Fixsternhimmel im Blick hat, zu den gelegentlich eingeschobenen Schaltsekunden am Jahresende (oder Jahresmitte) mit der Zählung 31.12. 23:59 59 s - 31.12. 23:59 60 s - .0 h 0 min 0 s.¹³⁸

Besonders interessant sind die Lösungen der Allgemeinen Relativitätstheorie für Szenarien, in denen extreme, gravitative Bedingungen herrschen. So haben Sterne je nach Masse unterschiedliche Entwicklungen, wenn ihr Kernbrennstoff erschöpft ist. Am Ende des Sternlebens etwa von der Größe der Sonne entsteht ein Weißer Zwerg. Die maximale Masse ist die Chandrasekhar-Grenze. Sie hängt davon ab, aus welchen Isotopen der weiße Zwerg besteht. Für Kohlenstoff und Sauerstoff sind es 1,457 Sonnenmassen („ca. $\sqrt{2}$ “), bei Eisenkernen etwa 2,154 Sonnenmassen. Darüber hinaus entstehen

¹³⁵ <http://www.xn--relativittsprinzip-ttb.info/experimente/myonen-lebensdauer.html>

¹³⁶ „Die Sekunde ist das 9 192 631 770-fache der Periodendauer der dem Übergang zwischen den beiden Hyperfeinstrukturniveaus des Grundzustandes von Atomen des Nuklids ¹³³Cs entsprechenden Strahlung.“ Quelle: BIPM (Bureau International des Poids et Mesures): Internationales Büro für Maß und Gewicht, 1967. Zitiert nach https://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/fachabteilungen/abteilung_4/Wie_funktioniert_eine_Atomuhr_new.pdf

¹³⁷ https://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/fachabteilungen/abteilung_4/4.4_zeit_und_frequenz/pdf/sekunde.pdf

¹³⁸ Filk, Giuliani, ebenda, S. 40

Neutronensterne. Dabei sind Protonen und Elektronen zu Neutronen verdichtet worden. Ein Neutronenstern hat ca. 11 km Durchmesser.¹³⁹ Kollabiert ein im Vergleich zur Sonnenmasse großer Stern, so kann der quantenmechanisch erklärbare Entartungsdruck¹⁴⁰ der Materie den weiteren Kollaps nicht mehr

LIGHTS ALL ASKEW IN THE HEAVENS

Men of Science More or Less
Agog Over Results of Eclipse
Observations.

EINSTEIN THEORY TRIUMPHS

Stars Not Where They Seemed
or Were Calculated to be,
but Nobody Need Worry.

A BOOK FOR 12 WISE MEN

No More in All the World Could
Comprehend It, Said Einstein When
His Daring Publishers Accepted It.

Abb. 15: Schlagzeile der
New York Times vom 10.
November 1919

aufhalten. Das kleinste bisher gefundene Schwarze Loch hat 3,8 Sonnenmassen.¹⁴¹ Theoretische Abschätzungen setzen die Massengrenze, ab der ein Schwarzes Loch entsteht, etwas tiefer an. Es sind mittlerweile Objekte fast jeder Größenordnung bekannt - bis hin zu riesigen Schwarzen Löchern, die höchstwahrscheinlich im Zentrum von fast allen Galaxien vorkommen. Man kann vier Fälle, sogenannte Metriken, unterscheiden, für die es mathematische Lösungsansätze, insbesondere auf Basis der allgemeinen Relativitätstheorie, gibt: Es sind die Kombinationen geladen, ungeladen, rotierend und nicht rotierend. Die älteste und einfachste Lösung der Feldgleichungen wurde von Karl Schwarzschild gefunden. Die Grenze eines Schwarzen Lochs, ab der auch kein Licht bzw. elektromagnetische Strahlung der Schwerkraft entkommen kann, wird nach ihm Schwarzschild-Radius oder Ereignishorizont genannt. Es genügt angesichts der extremen Gravitation nicht, nur den Begriff

„Raumkrümmung“ zu bemühen. Es geht insgesamt um die Auswirkungen auf die Raumzeit, also auch der Zeitkomponente in der vierdimensionalen Raumzeit. Bezogen auf die Zeit ist es auch im Einfluss der Gravitation (und nicht nur der relativen Geschwindigkeit) besser von unterschiedlichen Zeitverläufen bei Beobachtern in unterschiedlichen Bezugssystemen zu sprechen. Dabei zeigt die Rechnung, dass für einen externen Beobachter ein Objekt, das den Ereignishorizont erreicht, still zu stehen scheint. Der Zeitverlauf des Objekts endet aus Sicht des externen Beobachters hier. Der Ereignishorizont begrenzt somit die Raumzeit, so „dass Ereignisse jenseits dieser Grenzfläche prinzipiell nicht sichtbar für Beobachter sind, die sich diesseits der Grenzfläche

¹³⁹ <https://www.mpg.de/14573502/neutronenstern-durchmesser>

¹⁴⁰ Siehe dazu etwa <https://www.einstein-online.info/explandict/entartungsdruck/>

¹⁴¹ <https://www.astronews.com/news/artikel/2008/04/0804-003.shtml>

befinden“.¹⁴² Noch pointierter formuliert: Ein Schwarzes Loch ist deshalb schwarz, weil der Ereignishorizont in unendlicher Zukunft des Außenbeobachters liegt. Für einen „internen Beobachter“, der den Horizont überquert, gibt es dagegen keine Veränderung im Zeitverhalten.

Schwarze Löcher sind auf jeden Fall reale Gebilde, die nach der einsteinschen Gravitationstheorie eine Singularität enthalten, bei denen, salopp formuliert, unendliche Werte auftreten. Im Rahmen der Allgemeinen Relativitätstheorie müssen Singularitäten entstehen. Etwas genauer definiert, zeichnet sich eine Singularität durch eine divergierende Raumzeitkrümmung aus. Es spricht sehr viel dafür, dass es keine „nackten Singularitäten“ geben kann. Penrose nennt dies „kosmische Zensur“,¹⁴³ d.h. jede Singularität ist von einem Ereignishorizont umgeben. Fällt Materie in ein Schwarzes Loch so ist die Gesamtfläche des resultierenden Ereignishorizontes größer oder gleich des ursprünglichen. Verschmelzen zwei Schwarze Löcher, so ist die Gesamtfläche des resultierenden Ereignishorizontes größer oder gleich der Summe der ursprünglichen Ereignishorizonte.¹⁴⁴ Ursprünglich dachte man, dass die Entropie des Universums durch Schwarze Löcher abnimmt und somit der 2. Hauptsatz der Thermodynamik verletzt wäre.¹⁴⁵ Doch Stephen Hawking leitete ab, dass ein Schwarzes Loch Strahlung abgeben kann und ihm damit eine Temperatur und Entropie zugeordnet werden muss. Ursprünglich ist dies eine Erkenntnis von Bekenstein, die heute nach beiden Forschern benannt ist. Die Bekenstein-Hawking-Entropie ordnet einem Schwarzen Loch einen formalen Entropiewert zu, der nur vom Oberflächeninhalt des Ereignishorizontes und von fundamentalen Naturkonstanten abhängt. Direkt am Schwarzschildradius entstehen gemäß der Quantentheorie (wie überall) virtuelle Teilchen/Antiteilchen-Paare, von denen eines in das Schwarze Loch fallen kann, während das andere entweicht. Somit kann man über diese sogenannte Hawking-Strahlung dem Schwarzen Loch eine Entropie und damit eine Temperatur zuordnen. Da die Strahlung von der Oberfläche abhängt, ist sie zu dieser proportional und nicht zum Volumen. Dies ist bemerkenswert.

Eine theoretische Besonderheit stellen sogenannte Wurmlöcher dar, bei denen keine Singularitäten auftreten müssen. Im bekannten euklidischen Raum gibt es durch zwei Punkte genau eine Gerade. In der Raumzeit der Allgemeinen

¹⁴² <https://www.spektrum.de/lexikon/astronomie/ereignishorizont/107>

¹⁴³ Siehe 2. Vorlesung, Roger Penrose, Zur Struktur raumzeitlicher Singularitäten, in Stephen Hawking, in Stephen Hawking, Roger Penrose, Raum und Zeit, Rowohlt, 1998, S. 41 ff

¹⁴⁴ Ebenda, S. 36

¹⁴⁵ Siehe dazu Leonhard Susskind; Der Krieg um das Schwarze Loch, Suhrkamp, Berlin 2010

Relativitätstheorie können über eine sogenannte Einstein-Rosen-Brücke gleichzeitig zwei direkte, sozusagen „gerade“, geodätische Verbindungen existieren, sozusagen ein „längerer“ und ein „kürzerer“ Weg zwischen den gleichen zwei Punkten, wobei die Wege beide auf einer geodätischen¹⁴⁶ Linie/Kurve liegen (unter Berücksichtigung der 4. Dimension). Es ist also ein „Tunnel“ zwischen möglicherweise weit voneinander entfernten Raumbereichen denkbar. Lange Zeit dachte man, dass nur über exotische Materie mit besonderen energetischen Eigenschaften solch eine „Fast-Singularität“ offengehalten werden könnte. Doch mittlerweile gibt es theoretische Szenarien, die ohne exotische, unbekannte Materieformen auskommen.¹⁴⁷ Auf jeden Fall wäre auch Fortbewegung oder Kommunikation in einem Wurmloch nicht schneller als mit Lichtgeschwindigkeit möglich und es gilt das Kausalitätsprinzip, dass die Vergangenheit die Zukunft beeinflussen kann, aber nicht umgekehrt.

Manche Lösungen der einsteinschen Feldgleichungen widersprechen jedoch sogar diesen Prinzipien, die bisher als fundamental angesehen wurden und es ist erst recht offen, ob die Natur diese realisieren könnte. So war Kurt Gödel, einer der größten Logiker/Mathematiker des 20. Jahrhunderts und enger Freund von Albert Einstein in ihrer gemeinsamen Zeit in Princeton, aufgefordert worden, einen mehr philosophischen Beitrag zu einem Sammelband über Einstein zu schreiben. In seiner üblichen Akribie vertiefte er sich in die Theorie und fand eine Klasse von bemerkenswerten Lösungen. Es ist bekannt, dass in Universen, die in Bezug auf jeden beliebigen, lokalen Trägheitskompass rotieren, keine Gleichzeitigkeit existieren kann. Diese Verletzung des machschen Prinzips war Ausgangspunkt für die Allgemeine Relativitätstheorie. Gödel fand darüber hinaus, dass in rotierenden Universen gemäß der Theorie dieser Lösungsklasse auch Reisen in die Vergangenheit möglich sind. Genauer: Die Gleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie lassen geschlossene, zeitartige Kurven zu und zeigen, dass die Zeit in unserer durch diese Theorie gut beschriebenen Welt weder gleichförmig noch gerichtet sein muss.^{148,149} Dagegen sind Reisen in die

¹⁴⁶ „Gerade“ soll hier einfach die Bezeichnung für ein Objekt sein, das die Axiome für die angewandte Geometrie erfüllt. Geodäte ist allgemein die lokal kürzeste Verbindungskurve zwischen zwei Punkten einer Mannigfaltigkeit. Auf der Erde sind Geodäten Großkreise.

¹⁴⁷ Ping Gao, Daniel Louis Jafferis, Aron C. Wall, Traversable Wormholes via a Double Trace Deformation, siehe arxiv:1608.05687

¹⁴⁸ Man beachte aber den Einfluss der Entropie; siehe Kapitel „Zeitverläufe“

¹⁴⁹ Streng genommen gibt es drei grundsätzliche, kosmologische Interpretationen der Allgemeinen Relativitätstheorie:

- 1) Einsteins Version, der zunächst ein statisches Universum bevorzugte und dies über die kosmologische Konstante erreichen wollte (später von ihm revidiert).
- 2) Georges Lemaître setzte die kosmologische Konstante gleich Null und konnte so die Expansion des Weltalls, aber auch den „Urknall“ postulieren.

Zukunft schon gemäß der Speziellen Relativitätstheorie prinzipiell möglich. Sie verletzen nicht das Kausalitätsprinzip. Doch diese gödelschen Lösungen können zu paradoxen Szenarien führen. Während andere Wissenschaftler vermuteten, dass ein noch unbekanntes Naturgesetz diese Zeitreisen verhindert, war Gödels Schlussfolgerung radikaler. Er war der Ansicht, dass unser Zeitbegriff grundsätzlich falsch ist.¹⁵⁰ „Eine Vergangenheit, die man erneut aufsuchen kann, ist nicht wirklich vergangen.“¹⁵¹

Trotzdem ist die eigentliche Erkenntnis, die in der Allgemeinen Relativität steckt, vor allem in der populärwissenschaftlichen Literatur noch nicht richtig angekommen. Dazu ist die Metapher vom gekrümmten Raum zu plakativ. Im folgenden Kapitel soll in Zusammenhang mit quantenmechanischen Überlegungen versucht werden, die Begriffe Raum und Zeit konsequent vor dem Hintergrund der beiden großen Theorien des 20. Jahrhunderts neu zu bewerten.

Zeit und Raum in Quantengravitationstheorien

Die allgemeine Relativitätstheorie (ART) und die Quantenmechanik ist dann nicht vereinbar, wenn es sich um sehr hohe Teilchenenergien (Planck-Skala) oder sehr kleine Raumzeitgebiete mit starker Krümmung handelt. Die Vorhersagen der ART sind sehr gut bestätigt, aber es muss eine umfassendere Theorie geben, in der die ART ein Spezialfall bzw. eine erste Näherung ist. Genauso ist die newtonsche Theorie eine sehr gute Näherung der ART bei kleinen Massen.

Um Quantentheorie und Allgemeine Relativitätstheorie (ART) zusammen zu führen, müssen in erster Näherung zwei Ziele erreicht werden. Einstein selbst hat die ART deshalb als Zwischenschritt zu einer noch allgemeineren Theorie gesehen. Die ART sieht sozusagen ihre eigenen Grenzen. Es lassen sich Folgerungen aus der ART beweisen, dass sich der kürzeste Weg zwischen zwei Punkten der Raumzeit (Geodäte) nicht über eine Singularität fortsetzen lässt, weil die klassische Beschreibung hier endet. Mathematisch wird dieses erste

-
- 3) Kurt Gödels Rechnungen zeigten, dass in einem rotierenden Universum die Gleichungen räumliche Wege erlauben, die sich rückwärts in der Zeit krümmen.

¹⁵⁰ Karl Sigmund, Sie nannten sich DER WIENER KREIS, S. 311 ff, siehe auch <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/machsches-prinzip/9262>, insbesondere „newtonscher Eimer“

¹⁵¹ Zitiert nach Jim Holt; Als Einstein und Gödel spazieren gingen, Rowohlt, April 2020, S. 28

Ziel deutlich, wenn bei Anwendung der ART Unendlichkeiten auftreten.¹⁵² So würde im Inneren von Schwarzen Löchern scheinbar ein Zustand unendlicher Raumzeitkrümmung entstehen.¹⁵³ Unendlich stark gekrümmte Raumzeit ist die Vorstellung einer klassischen Theorie ohne Berücksichtigung von Quantenfluktuationen. Das ist in der realen Welt praktisch undenkbar und kann in einer umfassenden Theorie nicht passieren.¹⁵⁴ Bei anderen Theorien, die sich auf einen Aspekt beschränken, ist es nicht ungewöhnlich – z.B. in der Hydrodynamik. So wird bei einem Wassertropfen die Krümmung der Wasseroberfläche an der Spitze des Tropfens gemäß den Gleichungen der Hydrodynamik unendlich groß, weil man vereinfacht annimmt, dass Wasser eine zusammenhängende Flüssigkeit ist. An der Spitze des Tropfens versagt die Theorie. Im Bereich der Quantentheorie ist die tiefere Ursache für unendliche Werte oft die heisenbergsche Unschärferelation. Sie besagt hier speziell,¹⁵⁵ dass Ort und Impuls eines Teilchens nicht beliebig genau bestimmt werden können. Das Produkt aus Ortsunschärfe und Impulsunschärfe ist immer größer oder gleich der planckschen Naturkonstanten h .¹⁵⁶ Wenn also die Länge eines Teilchens immer kleiner wird, wird der Impuls immer größer und würde bei verschwindender Länge unendlich groß werden. Alle Theorien, die Quantengravitation in Raum und Zeit beschreiben, müssen also zu kleinen, aber nicht punktförmigen Längen führen.¹⁵⁷ Dabei darf auch die Länge nicht zu klein werden. Aus der Unschärferelation zwischen Zeit und Energie folgt, dass die Messung einer Zeitdauer Δt mit der Unschärfe einer Energie ΔE verknüpft ist; aus der Allgemeinen Relativitätstheorie folgt andererseits, dass eine Energiedichte in einem bestimmten Volumen eine Krümmung der Raumzeit zur Folge hat, wobei eine zu hohe Energiedichte zu einem schwarzen Loch führt.

¹⁵² Genau genommen geht die Gültigkeit der ART nur bis zur Planck-Zeit und der Planck-Länge (Definitionen siehe unten).

¹⁵³ Schwarze Löcher sind interessante Beispiele. Die Singularität muss jedoch nicht in einem Schwarzen Loch liegen.

¹⁵⁴ Roger Penrose glaubt übrigens nicht, dass die Quantengravitation die Singularitäten beseitigt. Dem Urknall müsste sonst aus mathematischen Gründen eine Kollapsphase vorangegangen sein und die Entropie in dieser Phase müsste sehr klein sein. Damit ist der 2. Hauptsatz der Thermodynamik schwer zu erklären.

¹⁵⁵ Es handelt sich bei Ort und Impuls um sogenannte komplementäre Observable. Sie können nicht zusammen und beliebig genau gemessen werden. Dazu gehören z.B. auch Energie und Impuls oder Energie und Ort.

¹⁵⁶ $\Delta x \cdot \Delta p \sim h$. Eine harmonische Schwingung kann Energie nur in diskreten Quanten ΔE aufnehmen oder abgeben, wobei $\Delta E = h \cdot \gamma$ mit der Frequenz γ bzw. der Kreisfrequenz $\omega = 2\pi \cdot \gamma$ ist. Dies ist einer der vielen Gründe, wieso h eine so überragende fundamentale Bedeutung in der Physik hat.

¹⁵⁷ Da Impuls das Produkt aus Masse und Geschwindigkeit ist und Geschwindigkeit zurück gelegte Distanz pro Zeiteinheit ist, darf auch die Zeit im Nenner nicht gegen Null gehen. Auch die „Zeitquanten“ dürfen somit nicht beliebig klein werden.

Die Messung eines Volumens von der linearen Ausdehnung der Planck-Länge ($\approx 10^{-33}$ cm) innerhalb eines Zeitraumes der Planck-Zeit ($\approx 5 \cdot 10^{-44}$ s) impliziert eine Unschärfe in der Energiedichte in diesem Volumen, die einem schwarzen Loch dieser Größe entspricht. Auf diesen kleinen Skalen werden somit durch Quantenfluktuationen ständig schwarze Löcher erzeugt und wieder vernichtet. Eine solche Raumzeit ist weit von einem "glatten" Kontinuum entfernt. Der Physiker John Archibald Wheeler hat in diesem Zusammenhang den Begriff des Spacetime Foams (Raumzeit-Schaums) geprägt, weil in diesen Größenordnungen kein Kontinuum der Raumzeit möglich ist. Spätestens hier sind Vorstellungen einer glatten Raumzeitstruktur nicht mehr zu halten. Als plakatives Beispiel bietet sich etwa Wasser an. Wir können die diskrete Struktur der Moleküle erst auf der atomaren Ebene auflösen – im makroskopischen Maßstab erschließt sie sich nicht. Aber man beachte: Zwischen den Abmessungen von Wassermolekülen und der Planck-Länge liegen 25 Größenordnungen.¹⁵⁸

Vielleicht noch schwerwiegender sind aber unterschiedliche philosophische Konzepte in beiden Theorien. Während die ART absolute Zeit und absoluten Raum überwunden hat, verwendete die Quantentheorie dabei anfangs Konzepte, die noch klassische Elemente tragen. Quantenfluktuationen sind dabei noch nicht berücksichtigt. Zwar wurde bereits 1928 durch Paul Dirac eine Gleichung entwickelt, die eine relativistische Beschreibung des Elektrons darstellt. Es war dabei nicht möglich, diese Beziehung deduktiv zu finden, in dem die Spezielle Relativitätstheorie auf die Schrödinger-Gleichung angewendet wird. Die Gleichung wurde eine Basis der relativistischen Quantenphysik, aber sie ist der Genialität eines Paul Adrian Maurice Dirac zu verdanken.^{159,160} Es bleiben aber die entscheidenden Unterschiede: Die Quantentheorie kennt erst dann eine absolute Zeit, wenn die Wellenfunktion kollabiert und Messergebnisse nichtdeterministisch vorhersagbar vorliegen. Die

¹⁵⁸ Die Planck-Zeit ist die Zeitdauer, die das Licht benötigt um die Planck-Länge zu durchlaufen. Die Planck-Länge L_P , Planck-Zeit T_P und Planck-Masse M_P kombinieren die 3 Universalkonstanten, die für Gravitation (Newtons Gravitationskonstante G), Relativität (Lichtgeschwindigkeit c) und Quantentheorie (Planck'sches Wirkungsquantum $\hbar=h/2\pi$) stehen und sind somit ideale Maßeinheiten:

$$L_P = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} \approx 1,62 \cdot 10^{-35} \text{ m.}$$

$$T_P = \frac{L_P}{c} = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^5}} \approx 5,40 \cdot 10^{-44} \text{ s.}$$

$$M_P = \frac{\hbar}{L_P c} = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}} \approx 2,17 \cdot 10^{-8} \text{ kg.}$$

¹⁵⁹ Zur Entstehungsgeschichte der Gleichung siehe auch Graham Farmelo; Der seltsamste Mensch, Springer Nature 2016, 2. Auflage 2018, S. 146 ff

¹⁶⁰ Sie ziert Diracs Gedenkplakette in der Westminster Abbey in einer knappen Form

$$i\gamma \cdot \partial \psi = m \cdot \psi$$

Allgemeine Relativitätstheorie kennt nur Eigenzeiten, in denen jeweils ein Zeitpfeil (Ausnahme in rotierenden „Gödel-Universen“) existiert.

Immer noch bestehen also große Unterschiede in der naturwissenschaftlichen Philosophie der beiden großen Theorien, besonders, wenn Raum und Zeit eine Rolle spielen. Werner Heisenberg hat die entscheidenden Unterschiede in seinem Nobelpreis-Vortrag¹⁶¹ zusammengefasst: *„Die klassische Physik stellt jenes Streben nach Naturerkenntnis dar, bei dem wir grundsätzlich von unserer Wahrnehmung auf objektive Vorgänge zu schließen suchen und daher auf die Berücksichtigung der Einflüsse verzichten, die jede Beobachtung auf das zu beobachtende Geschehen ausübt; die klassische Physik hat daher ihre Grenze eben an der Stelle, wo vom Einfluß der Beobachtung auf das Geschehen nicht mehr abgesehen werden kann. Die Quantenmechanik umgekehrt erkaufte die Möglichkeit der Behandlung atomarer Vorgänge durch den teilweisen Verzicht auf ihre raum-zeitliche Beschreibung und Objektivierung.“*

Heisenberg verwendet „teilweisen Verzicht“ mit Recht. Besonders beim Begriff des „Raums“ hat die Quantenmechanik insbesondere bei der Frage nach dem „leeren Raum“ die Denkweise verändert. Der Begriff „Vakuum“ hat die Unterscheidung zwischen „leer“ und „nicht leer“ praktisch aufgehoben. Vakuum ist der Grundzustand des Hamilton-Operators und ersetzt somit den Begriff des leeren, absoluten Raumes. Anders ist es mit der Zeit. Der Hamilton-Operator generiert die Zeitentwicklung eines quantenmechanischen Systems und weist der „Zeit“ somit die newtonsche Bedeutung einer absoluten Zeit in der Quantenmechanik zu.

Bei der Quantengravitation müssten diese gegenseitigen Grenzen zwischen den grundlegenden Theorien überwunden werden.

Aber wie?

John Wheeler schreibt 1984: *No question about quantum gravity is more difficult than the question, „What is the question?“*¹⁶²

Ausgangspunkt ist die ART und die dort verwendete Tensorrechnung.¹⁶³ Die ART muss zunächst um weitere Variablen erweitert werden. Man unterscheidet zwischen kovariantem und kanonischem Zugang. Physikalisch sind damit

¹⁶¹ Zitiert nach einem Beitrag von Peter Debye in „25 Jahre Kaiser Wilhelm Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften“, redigiert von Max Hartmann, Band 2, Verlag Julius Springer, Berlin 1936, S. 56

¹⁶² Wheeler, J. A.: Quantum Gravity: the question of Measurement. In: S. M. Christensen (ed.) Quantum Theory of Gravity, Adam Hilger, Bristol (1984)
Zitiert nach Claus Kiefer in arxiv:0812.0295

¹⁶³ Gregorio Ricci-Curbastro und Tullio Levi-Civita entwickelten die Tensorrechnung auf riemannschen Mannigfaltigkeiten und veröffentlichten das Buch „Calcolo differenziale assoluto“, aus dem sich Albert Einstein die mathematischen Grundlagen zur Entwicklung der ART aneignete.

Zugänge über die vierdimensionale Raumzeit bzw. über den dreidimensionalen Raum verbunden.¹⁶⁴ Kanonische Abbildung nennt man in der Mathematik auch natürliche Abbildung. Einzelne Versionen kanonischer Theorien unterscheiden sich darin, welche verallgemeinerten Orte und Impulse auf dem Raum gewählt werden („kanonisch-konjugierte Variablen“). Es handelt es sich zumindest in der traditionellen Formulierung um eine dreidimensionale Metrik.

In kovarianten Zugängen ist die vierdimensionale Mannigfaltigkeit der Raumzeit die fundamentale theoretische Basis. Man versucht in der Regel, wie bei Quantenfeldtheorien, störungstheoretisch die Theorie aufzubauen. In einer Reihe von kovarianten Theorien mit bestimmten Hintergrundraumzeiten wird die Gravitationskraft, mit der sich Masse und/oder Energie anziehen, durch ein hypothetisches Spin-2-Teilchen, das Graviton, vermittelt. Wie die anderen drei Grundkräfte aus dem Standardmodell (starke Kernkraft, schwache Kernkraft, elektromagnetische Kraft) wäre es das Austauscheteilchen („Boson“) der Gravitation. Allerdings hat im Gegensatz zu den drei Kräften im Standardmodell die Eliminierung von Unendlichkeiten durch Renormierung nicht funktioniert. Durch die Schwäche der Gravitation ist das Graviton mit den heute vorstellbaren Beschleunigertechnologien auch praktisch nicht nachweisbar, weil es zu schwer wäre. Ein experimenteller Ausweg könnte höchstens bei der quantenmechanischen Überlagerung liegen, bei der man misst, wie sich die Krümmung der Raumzeit verhält. Allerdings muss die Masse dafür groß genug sein. Schätzungen liegen bei einem Milligramm oder größer. Das ist beim Stand der Forschung noch unvorstellbar groß. Dieser theoretische Ansatz, in dem die vierdimensionale Mannigfaltigkeit der Raumzeit eine fundamentale Rolle spielt, gilt als veraltet.

Bei kanonischen Zugängen zur Quantengravitation liegt der Fokus auf dem dreidimensionalen Raum mit verallgemeinerten Orten und Impulsen. Je nach gewähltem Ansatz ergeben sich Varianten, wie der dreidimensionale Raum in die vierdimensionale Raumzeit eingebettet ist. Abhay Ashtekar benutzt als kanonische Variable Elemente der $SU(2)$ -Gruppe (sogenannte unitäre (2×2) -Matrizen). Das war ein entscheidender mathematischer Beitrag für die Schleifenquantentheorie (s.u.). Generell haben kanonische Zugänge das „Zeitproblem“, in dem die Grundgleichungen keinen Zeitparameter mehr haben. Dies gilt im Prinzip für viele Varianten von Quantengravitationstheorien.

Zwei grundsätzliche Ansätze zur Überwindung der Unverträglichkeit zwischen ART und Quantentheorie sollte man unterscheiden.¹⁶⁵ Man kann versuchen, die

¹⁶⁴ Siehe dazu auch

<https://www.spektrum.de/lexikon/physik/quantengravitation/11859>

¹⁶⁵ Darüber hinaus gibt es weitere Ansätze, in denen Aspekte der ART und Quantentheorie versucht werden zu vereinigen. Im zitierten Artikel wird die Zeit als

drei Grundkräfte aus dem Standardmodell plus der Gravitation einzubeziehen oder man kann Theorien entwickeln, die zunächst eine „Quantisierung“ der Gravitation anstreben.¹⁶⁶ An dieser Stelle sollen zwei Theorien bzw. Theoriegruppen besonders betrachtet werden, eine, die nicht zu den Quantenfeldtheorien gehört (String-Theorie und verwandte Ansätze) und eine kanonische Theorie, wobei insbesondere auf die Schleifenquantentheorie (loop quantum gravity) als Beispiel eingegangen wird. Weitere Beispiele sind die „kausale dynamische Triangulation“ (CDT) und die „Asymptotische Sicherheit in der Quantengravitation“ (Asymptotic safety in quantum gravity).

Um es vorweg zu sagen: Noch kein Kandidat kann alle theoretischen Anforderungen erfüllen und erst recht liegen keine eindeutigen experimentellen Belege vor.

Den ersten Weg geht seit Anfang der 1980er Jahre die Stringtheorie. Sie vermeidet Unendlichkeiten, in dem sie keine punktförmigen Teilchen zulässt, sondern elementare Fäden (Strings) oder Membranen annimmt. Die Stringtheorie ist mathematisch sehr anspruchsvoll. Entscheidend ist jedoch der Anspruch, dass alle Grundkräfte in einer „Theory of Everything“ beschrieben werden sollen. Die Tatsache, dass mit Edward Witten 1990 erstmals ein auf diesem Gebiet arbeitender Physiker die Fields-Medaille¹⁶⁷ bekommen hat, zeigt die Komplexität überdeutlich. Die Stringtheorie war lange Zeit physikalisch vielversprechend, aber sie zieht zunehmend Kritik auf sich. Sie bindet wohl immer noch erhebliche personelle Ressourcen in diesem Bereich der mathematischen Physik. Der zweite Grund ist aber noch wichtiger. Leider sind experimentell überprüfbare Voraussagen zur Verifizierung der Theorie kaum in Sicht. Die Theorie und ihre Weiterentwicklungen bewegen sich in scheinbar experimentell unerreichbaren Größenordnungen im Bereich der Planck-Länge L_P von 10^{-35} m. Planck-Länge und Planck-Zeit (10^{-44} s) stellen gewisse prinzipielle Grenzen dar, weil dort hypothetische Strukturen, wie eben die Strings, aufgrund der heisenbergschen Unschärferelation zu Schwarzen Löchern kollabieren müssen. Sie eignen sich deshalb auch als Einheiten. Zum

eine periodische Schwingung, ähnlich einem Pendel, verstanden. Dabei gibt es das Phänomen Zeitdilatation der ART und andererseits Quantenfluktuationen.

Garrett Wendel, Luis Martínez, Martin Bojowald, Physical Implications of a Fundamental Period of Time, Phys. Rev. Lett. 124, 241301 – Published 19 June 2020, siehe <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.124.241301>

¹⁶⁶ Für die folgenden Passagen siehe auch Willi Kafitz, Oberhessische Naturwissenschaftliche Zeitschrift, Band 67, 2020, S. 71ff oder <http://geb.uni-giessen.de/geb/volltexte/2017/13153/>. Einige Sätze zur Stringtheorie wurden fast wörtlich übernommen.

¹⁶⁷ Die Fields-Medaille wird gerne als Nobel-Preis für Mathematik bezeichnet; wird aber nur alle vier Jahre an maximal vier Forscher unter 40 Jahren vergeben.

Vergleich: Die „Auflösung“ des LHC¹⁶⁸ liegt für 14 TeV Kollisionen bei 10^{-19} m, das entspricht dem Zehnmillionstel eines Billionstelometers und liegt immer noch 16 Größenordnungen über der Planck-Länge. In kaum absehbarer Zeit wird jedes Labor der Welt Teilchen dieser Planck-Größenordnung als punktförmig betrachten und damit eventuell vorhandene Substrukturen nicht auflösen und identifizieren können. Zudem ist es noch offen, wie die bestehenden zeitabhängigen Theorien inkl. der klassischen Physik der ART als Grenzfälle hervorgehen sollen, denn der Zeitparameter ist als isolierte Größe durch die Quantelung der Raumzeit praktisch „verloren gegangen“. Aber es gibt zumindest theoretisch hoffnungsvolle Ergebnisse. Ein Beispiel ist die mathematische Konstruktion von Zukunft und Vergangenheit und fußt auf Aspekten der Gruppentheorie, die sich mit Symmetrien im mathematischen Sinne beschäftigt. Fundamentale Gesetze müssen unter bestimmten Symmetrioperationen invariant sein. Das ist Unabhängigkeit von Ort, Zeit und Richtung, aber im Bereich der Quanten kommen noch andere Symmetrien dazu. Da die Stringtheorie nur in einem 10, 11 oder noch höher dimensional Raum konsistent ist, sind deshalb mathematische Gruppen (z.B. $E(10)$) sehr wichtig, die in der Nähe des Urknalls als mathematisches Werkzeug interessant sein könnten.¹⁶⁹ Mathematisch gesehen, ist die heutige Form der String-Theorie(n) eine rein störungstheoretische Formulierung.¹⁷⁰ Sehr große Anstrengungen haben bisher daran nichts geändert. Eine nicht-störungstheoretische Form muss Strings, Membranen etc. hintergrundunabhängig beschreiben. Erst dann kann man nächste Schritte gehen. Damit ist die String-Theorie heute nicht hintergrundunabhängig und hat sich diesbezüglich deutlich weniger von der newtonschen Physik emanzipiert als die Allgemeine Relativitätstheorie. Trotz einiger Erfolge scheint die Anzahl der prominenten Gegner der Stringtheorie zu wachsen.¹⁷¹

¹⁶⁸ Large Hadron Collider am Europäischen Kernforschungszentrum CERN, der größte Teilchenbeschleuniger der Welt.

¹⁶⁹ Mit der unendlich dimensional Gruppe $E(10)$, „10“ steht für die minimale Variablenanzahl, kommt eine mathematische Gruppenstruktur ins Spiel, die überraschend gut auf die extrapolierte Physik der Hochenergiekollisionen passt und deutlich höhere Symmetrie besitzt. Auf $E(10)$ ist es gelungen, Konstrukte zu beweisen, die Zukunft und Vergangenheit entsprechen könnten. Siehe dazu die Sätze 1.16 und 1.17 folgender Arbeit: arxiv:1702.08426. Es ist aber noch offen, inwieweit dies der physikalischen Raumzeit der Allgemeinen Relativitätstheorie entspricht.

¹⁷⁰ Die Störungstheorie ist ein Bereich der angewandten Mathematik und behandelt Näherungsverfahren von aus Unkenntnis oder prinzipiell nicht analytisch lösbaren Problemen. So ist das Drei-Körper-Problem in der Himmelsmechanik scheinbar prinzipiell nicht exakt lösbar. Für eine Theorie, wie der String-Theorie, mit dem Anspruch „Theory of Everything“ zu werden, ist dies nicht akzeptabel.

¹⁷¹ Der US-amerikanische Physiker Peter Woit schrieb ein vielbeachtetes Buch mit massiver Kritik an der Stringtheorie „Not Even Wrong“. Der Titel spielt auf eine

Die Schleifenquantengravitation¹⁷² postuliert dabei, dass die Raumzeit kein beliebig teilbares Kontinuum darstellt, sondern eine kleinste, nicht weiter teilbare Entität besitzt. Raumvolumina oder Oberflächen hätten somit eine gewisse Körnigkeit im Bereich der Planck-Länge. Es bilden sich durch den gewählten mathematischen Ansatz diskrete, nicht weiter teilbare Strukturen.¹⁷³ Es gibt keine kleinere Oberfläche als $8\pi L_p^2$, also etwa 10^{-66} m². Der Ansatz ist durchaus begründet und soll mittlerweile von Näherungslösungen befreit sein. Es sind erste Hinweise auf die Möglichkeit experimenteller Überprüfung veröffentlicht worden.¹⁷⁴ Man kann ebenfalls physikalisch unsinnige, unendliche Ausdrücke vermeiden. Die Schleifenquanten-Theorie kommt ohne starren Hintergrund aus.

Das waren bisher allgemeine Vorbemerkungen zu beiden grundsätzlichen theoretischen Ansätzen. Natürlich fehlt immer noch die Bestätigung, dass die Natur sich so verhält.

Einstein hat im ersten Satz seiner 1905 veröffentlichten „Elektrodynamik bewegter Körper“ Bezug auf Maxwell genommen.

Maxwell hat die newtonsche Vorstellung vom absoluten Raum, der „Raumschachtel“, gefüllt mit Materie, um eine dritte Komponente erweitert, das elektromagnetische Feld. Es ist genau das, was wir sehen, denn z.B. das Bild im Spiegel ist nicht real, es ist reflektiertes Licht als Welle im deformiert schwingenden, elektromagnetischen Feld. Bei Radiowellen schwingt es langsamer, bei sichtbarem Licht schneller. Den gedanklichen Schritt machte Einstein 1915 bei der Gravitation, indem er ein Gravitationsfeld einführte. Die newtonschen, absoluten Vorstellungen von Raum und Zeit sind dabei nicht mehr zu halten.

Doch die Arbeiten von Maxwell einfach zu analogisieren, war nicht die größte intellektuelle Leistung von Einstein. Das Gravitationsfeld ist die „Raumschachtel“ – das ist der entscheidende Gedanke. In populärwissenschaftlichen Büchern wird dies meist nicht suggeriert. Der Raum wird als Gummituch dargestellt, das bei Anwesenheit von Materie deformiert

Bemerkung von Wolfgang Pauli an: „Das ist nicht nur nicht richtig, es ist nicht einmal falsch!“. Er meinte damit Theorien, die nicht überprüfbar sind. (Zitiert nach Rudolf Peierls, Physics Today, Dezember 1992, S. 112).

Auch Lee Smolin, der selbst 18 Artikel zum Thema veröffentlicht hat, kritisiert die Stringtheorie in seinem Buch „The Trouble with Physics“.

¹⁷² Alternative Begriffe: kanonische Quantengravitation, loop quantum cosmology

¹⁷³ Informationen dazu siehe z.B. Carlo Rovelli, Die Wirklichkeit, die nicht so ist, wie sie scheint. Rowohlt, Reinbek bei Hamburg, 2016, S. 179 ff

¹⁷⁴ Siehe Abhay Ashtekar, Ivan Agullo, William Nelson, The pre-inflationary dynamics of loop quantum cosmology: Confronting quantum gravity with observations, submitted 01. Feb 2013 (v1), last revised 08. Apr 2013 (v2), arxiv:1302.0254 (28.02.2017)

wird. Doch der Raum existiert nicht, auch nicht in deformierter Form. Es existiert ein dynamisches und flexibles Gravitationsfeld, wie es auch ein elektromagnetisches Feld gibt und nicht eine Raumschachtel, in der die Gravitation eine Sonderrolle spielt. Heute spricht man vom Prinzip der Hintergrundunabhängigkeit. Mit den Worten von Einstein: Das Gravitationsfeld „... bedingt nicht nur das Verhalten der trägen Massen, sondern wird in seinem Zustand auch bedingt durch die trägen Massen.“¹⁷⁵ Diese Erkenntnisse kamen nicht aus dem Nichts. Einstein hat sich nicht nur mit den Theorien von Faraday, Maxwell, Galilei und Newton und anderen intensiv auseinandergesetzt, sondern besonders die Widersprüche, die diese Theorien erzeugen, herausgearbeitet. Soviel zur Relativitätstheorie, nun zur Quantentheorie.

Starke Wechselwirkung	Elektrostatik	Magnetostatik	Schwache Wechselwirkung	Gravitation
	Elektromagnetische Wechselwirkung			
Quantenchromodynamik	Quantenelektrodynamik		Standardmodell	Allgemeine Relativitätstheorie
	Elektroschwache Wechselwirkung			Quantengravitation
Große vereinheitlichte Theorie (GUT)				
„Weltformel“, Theory of Everything (ToE)				

Abbildung 16: Historische und mögliche zukünftige Entwicklung unseres Verständnisses über die vier Naturkräfte. Quantengravitation, Große vereinheitlichte Theorie (GUT) und die sogenannte Weltformel oder „Theory of Everything“ sind in Entwicklung und spekulativ.¹⁷⁶

Die Quantentheorie hat zwei wesentliche Merkmale. Da ist zunächst das, was schon im Namen steckt und was Max Planck als erster konstatieren musste. Bei jedem Parameter (außer elementaren Eigenschaften wie Masse oder Ladung) gibt es kein kontinuierliches Spektrum an Werten, sondern nur ein diskretes. Gequantelte Werte findet man in der mikroskopischen Welt bei der Energie, bei

¹⁷⁵ A. Einstein, zitiert nach Rüdiger Vaas, Jenseits von Einsteins Universum, Kosmos, S. 256. Er vergleicht hier das Gravitationsfeld im übertragenden Sinn mit dem „Mach’schen Äther. Siehe auch Wheeler-Zitat im Kapitel Zeit und Raum bei Einstein.

¹⁷⁶ Quelle der Abbildung 16: Vom Autor erstellt nach einer veränderten Grafik unter https://de.wikipedia.org/wiki/Große_vereinheitlichte_Theorie

der Geschwindigkeit usw. Kein Wert kann beliebig klein werden, immer ist er gequantelt.

Die zweite Besonderheit ist der Zufall. Er entsteht nicht aus mangelndem Wissen. Es ist ein intrinsischer Zufall, eine Eigenschaft der Natur, die im Bereich der Quanten höchstens Wahrscheinlichkeiten angeben kann, aber keine deterministischen Voraussagen macht. Ein radioaktives Teilchen zerfällt zufällig zu einem unbestimmten Zeitpunkt, bei vielen, gleichartigen, radioaktiven Teilchen kann man lediglich eine Halbwertszeit angeben, in der die Hälfte der Teilchen zerfallen ist. Für die Position eines Elektrons im Atom lässt sich kein genauer Ort, sondern nur eine Wahrscheinlichkeit angeben, oft als Wolke beschrieben, die theoretisch für keinen Ort gleich Null ist. Sonst würde es den Tunneleffekt nicht geben und das Raster-Tunnel-Mikroskop hätte nicht entwickelt werden können. Heisenberg erklärte: *"An der scharfen Formulierung des Kausalgesetzes: ‚Wenn wir die Gegenwart genau kennen, können wir die Zukunft berechnen‘, ist nicht der Nachsatz, sondern die Voraussetzung falsch. Wir können die Gegenwart in allen Bestimmungsstücken prinzipiell nicht kennenlernen."*¹⁷⁷ In der klassischen Physik existieren Messgrößen im Prinzip bereits, bevor sie gemessen werden. In der Quantenphysik werden sie erst durch die Messung Realität. Quantenobjekte haben keine inhärente Realität.

Es ergibt sich folgendes aus diesen Vorbemerkungen: Das Gravitationsfeld ersetzt den Raum und somit die darauf definierte Raumzeit. Es sollte aus Quanten bestehen. Aber welche Formen haben diese Strukturen und wie kann man sie mathematisch fassen? Genauso wie man die Feldlinien eines Magneten mit Eisenfeilspänen veranschaulichen kann, müssen die „maxwellschen (oder faradayschen)“ Feldlinien des Gravitationsfeldes in Form von einzelnen, aber verknüpften Quanten wirken. Im elektromagnetischen Feld sind die Quanten des Feldes nichts Anderes als Photonen; im Gravitationsfeld kondensieren die Feldlinien ebenfalls zu Quanten, zu „Teilchen“ der Raumzeit. Mathematisch¹⁷⁸ zeigten Lösungen der sogenannten „Wheeler-DeWitt-

¹⁷⁷ Werner Heisenberg (1927): Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik, in: Zeitschrift für Physik 43 (1927), S. 172-198, hier: S. 198. Zitiert nach: A. Fölsing, Albert Einstein, Frankfurt/Main, 1993, S. 666

¹⁷⁸ Die Wheeler-DeWitt-Gleichung ist eine relativistische Formulierung der stationären Schrödinger-Gleichung. Dazu wird die Relativitätstheorie in eine hamiltonsche Form umgeschrieben, die eine allgemeinere Formulierung erlaubt. Allerdings ist sie nicht kovariant, es bestehen also Koordinatenabhängigkeiten. Die Wheeler-DeWitt-Gleichung separiert wieder Raum und Zeit und ist dann unabhängig von der Zeit. Raumartige Hyperflächen bilden zeitunabhängige „Blätter“ (Foliation). Wie bei einem Daumenkino kann durch die diskrete zeitliche Abfolge der Blätter ein Ordnungsparameter entstehen, der mit der Zeit identifiziert werden kann. Nur unter diesen wohldefinierten speziellen Umständen ergibt sich ein approximativer Zeitbegriff,

Gleichung“, dass es sich um geschlossene Linien, also Ringe oder Schleifen handeln musste – deshalb der Name „Schleifenquantengravitation“. ^{179,180,181}

Als erste Entdecker oder Urheber der Schleifenquantengravitationstheorie können Carlo Rovelli, Abhay Ashtekar und Lee Smolin gelten, wobei die erste Idee von dem italienischen Physiker Rovelli ausging. Ashtekar hat entscheidende mathematische Beiträge geleistet. Dadurch konnte ein Zusammenhang zu den Schleifenvariablen der Schleifenquantengravitation hergestellt werden.

Der Raum ist also durch diese theoretischen Leistungen zum kondensierten Gravitationsfeld geworden und komplizierte Rechnungen mit Hilfe der mathematischen Methoden der Quantentheorie machten den Quantencharakter des Raumes deutlich.

Wie kann man nun diese gequantelten „Raumkörnchen“ beschreiben?

Wie so oft fand sich eine passende mathematische Methode - hier aus dem Bereich der „diskreten Mathematik“, die sich mit endlichen oder abzählbar unendlichen diskreten Strukturen beschäftigt. Sie stammt in diesem Fall von dem großen englischen Mathematiker und Physiker Roger Penrose, der sie vor bereits 20 Jahren allein auf intuitiver Basis entwickelte. Er nannte sie

der mit dem Zeitbegriff in der Relativitätstheorie übereinstimmt. Offen ist, ob verschiedene Foliationen äquivalent sind, also keinen unterschiedlichen Einfluss auf die Physik haben. (Quelle https://www.heisenberg-gesellschaft.de/uploads/1/3/5/3/13536182/workshop2018_kiefer_praesentation.pdf)

¹⁷⁹ Für die Argumentationskette siehe auch Carlo Rovelli, Und wenn es keine Zeit gäbe? Rowohlt, 1. Deutsche Auflage, Reinbek bei Hamburg, 2019

¹⁸⁰ Siehe auch <https://www.einstein-online.info/spotlight/spinnetzwerke/>. Dies ist auch die Quelle der Grafik.

¹⁸¹ Die Stringtheorien sind keine Quantenfeldtheorien, folgen aber quantenfeldtheoretischen Methoden, d.h. Teilchen und Felder werden auf einem Hintergrund, der Raumzeit, betrachtet.

Die (englisch) loop quantum gravity dagegen ist unabhängig von einem Hintergrund. Diese Eigenschaft bezeichnet man mathematisch als (aktive) Diffeomorphismus-Invarianz.

Die Schleifen formen ein 'Gitter'. Die im Allgemeinen gekrümmte Raumzeit (Sprache der Relativitätstheorie) taucht dann in Form angeregter Zustände (Sprache der Quantentheorie) der Schleifen auf. Das Konzept folgt eher demjenigen der Quantenmechanik, wo ein Hamilton-Operator, die Dynamik des Systems in Form einer Schrödinger-Gleichung festlegt. Dies ist die Wheeler-DeWitt-Gleichung. Die Gleichung enthält keinen Zeitparameter mehr, sie beschreibt also nichts anderes als eine statische Wellenfunktion bezüglich der Menge aller dreidimensionalen Räume. Da die Vorgehensweise die von Einstein benutzte geometrische Beschreibung in die Quantentheorie überträgt, ist sie auch als Quantengeometrodynamik bekannt. In der Loop-Quantengravitation ist die Raumzeit (das Gravitationsfeld) eine Superposition (Überlagerung) von Spin-Netzwerken, so wie das elektromagnetische Feld in der Quantenelektrodynamik eine Superposition von Photonen ist.

Das Spin-Netzwerk ist nicht in der Raumzeit, es ist die Raumzeit.

Spinnetzwerke („spin networks“). Sie brachte einen gewissen Durchbruch bei der jungen Theorie. Rovelli fasst das verblüffende Ergebnis der Berechnung nach der Penrose-Methode so zusammen: „*Das Volumen ist tatsächlich eine nicht kontinuierliche Variable, und daher besteht der Raum aus Volumenquanten oder Raumkörnchen ...*“

Die neu angewandte Methode zeigte, dass sich die Raumquanten genau an den Schnittstellen der Schleifen befinden und somit die Raumkörnchen definieren oder darstellen.¹⁸² Die Schnittpunkte bilden den Raum oder besser die Raumzeit und die Verbindungen können als „Maxwell/Faraday-Linien“

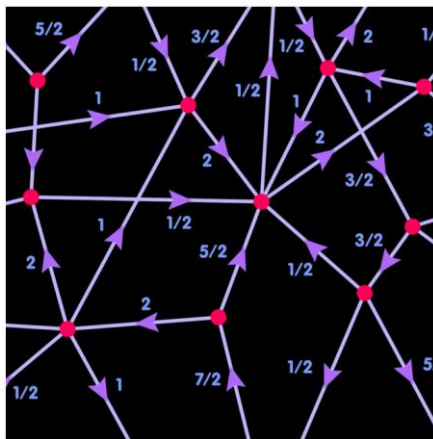


Abb. 17: Verdeutlichung von Spinnetzwerken.

Abdruck mit freundlicher Genehmigung des Max-Planck-Instituts für Gravitationsforschung, www.einstein-online.info, Potsdam.

interpretiert werden. Dabei gehört jeder Punkt zu mindestens zwei Schleifen; es müssen aber nicht nur gemeinsame Punkte, sondern können auch ganze Abschnitte sein. „*Die Zahl der Faraday-Linien, zu denen dieselbe Verbindungslinie gehört, ist eine ganze Zahl, die man als Spin der Verbindungslinie bezeichnet.*“¹⁸³

Sie wird aus historischen Gründen, wie der Spin von Elementarteilchen, in halbzahligen Werten angegeben.¹⁸⁴ Es ist also kein regelmäßiges Netzwerk, sondern jeder Verbindung ist ein Spinwert zugeordnet, der die Zahl der unterschiedlichen Schleifen

charakterisiert, die durch diese Verbindungslinie laufen.¹⁸⁵ Das Netzwerk besteht also aus Knoten, Linien, Pfeilen/Richtungen und Beschriftungen in ganzzahligen Vielfachen von $\frac{1}{2}$.

An dieser Stelle ist eine andere Darstellung sinnvoll, die man in der Mathematik als „dual“ bezeichnet. Es ist einfach eine äquivalente Sicht auf das gleiche Rechenproblem, die an dieser Stelle vorteilhafter ist. Von dem punktförmigen Knoten (Dimension Null) gehen Linien ab (Dimension 1). Ein solches Gebilde kann man benutzen, um ein Volumen zu beschreiben. Der Knoten sitzt dabei in

¹⁸² Carlo Rovelli, Und wenn es keine Zeit gäbe? S. 98-99

¹⁸³ Rovelli, ebenda, S. 99-100

¹⁸⁴ Bei einem Spin $\frac{1}{2}$ sind zwei vollständige Umdrehungen, also 720 Grad erforderlich, damit die ursprüngliche Orientierung wieder erreicht wird.

¹⁸⁵ Die Grafik wurde erstellt von Daniela Leitner und Markus Pössel von Einstein-Online, dem Webangebot des Max-Planck-Instituts für Gravitationsphysik. Abdruck mit freundlicher Genehmigung von Frau Dr. Elke Müller, Wissenschaftskoordination und Öffentlichkeitsarbeit, Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik (Albert-Einstein-Institut), Potsdam.

der Mitte und jede Linie repräsentiert eine Fläche, die senkrecht zur Linie steht. Die Linienlänge als Abstand zwischen Knoten und Fläche steht für die Größe der Fläche. Allerdings gibt es wegen der Hintergrundunabhängigkeit (background independence) zunächst keinen Bezugsrahmen, um eine Metrik zu definieren. Es müssen geeignete Operatoren konstruiert werden, zu denen die Zustände des Spinnnetzwerks sogenannte Eigenzustände sind, also Größen mit immer wohldefiniertem Wert. Dazu ist die duale Darstellung nützlich. Die Elemente in Abbildung 17 entsprechen dabei den Elementen in der räumlichen Darstellung. In dieser Darstellung entstehen vielfältige räumliche Gebilde, allerdings ist der Raum gekrümmt. Dabei hat man es mit Quanteneffekten zu tun. Es sind also keine kontinuierlichen Werte für Volumina möglich.¹⁸⁶ Die Größenordnung der begrenzenden Flächen liegt im Bereich der Planck-Fläche 10^{-66} cm^2 (Quadrat der Planck-Länge). Dazu hat das Ganze noch einen dynamischen Aspekt, wenn die Zeit ins Spiel kommt. In jedem Moment kann sich das Bild der Raumzeit in den kleinstmöglichen Strukturen ändern. Als plakative Vorstellung bietet sich der immerzu brodelnde „Quantenschaum“ („foam“) an, wobei der Schaum eher Kristallen als runden Bläschen entspricht. Diese „Kristalle“ liegen übrigens nicht „packungsdicht“. Wo sie nicht dicht zusammen liegen gibt es keinen Raum und keine Zeit. Allerdings muss man sehen, dass die grundlegenden Gleichungen der Schleifentheorie zunächst zeitlos sind.

Die Schleifenquantengravitation macht (Zitat) „...eine Reihe eindeutiger und ausformulierter Vorhersagen ..., welche sich überprüfen lassen.“¹⁸⁷

Leider geht die Allgemeine Relativitätstheorie nicht als Grenzfall aus ihr hervor und die Chancen stehen dazu auch schlecht. Natürlich sind auch hier Skalenbereiche im Spiel, die sich in ihrer Kleinheit fast der menschlichen Vorstellungskraft entziehen. Rovelli gibt die Zahl der Schleifen, die sich auf dieser Buchseite befinden, mit 10^{70} an.

Die Szenarien, in denen grundsätzlich diese Theorien getestet werden können, liegen allerdings mehr im Großen, also in der Kosmologie beim Urknall oder bei den thermischen Eigenschaften von Schwarzen Löchern, der sogenannten Hawking-Strahlung (siehe Abbildung 18).¹⁸⁸ In der Kosmologie könnten die allerersten Raumzeitkörnchen Spuren in der immer besser vermessenen

¹⁸⁶ Die Quantenmechanik verletzt zwei eherne Prinzipien:

Natura non facit saltus (Die Natur macht keine Sprünge).

Tertium non datur (Ein Drittes ist ausgeschlossen; es gibt nur ja oder nein, keine Zwischenzustände, worauf die Stärke von Quantencomputern beruhen wird).

¹⁸⁷ C. Rovelli, Und wenn es die Zeit nicht gäbe?, S.103

¹⁸⁸ Quelle der Abb. 18: Eigene Grafik, inspiriert von

<https://www.faz.net/aktuell/wissen/physik-mehr/experimentelle-quantengravitation-14514580/hawking-strahlung-oben-kann-14514281.html>

kosmischen Hintergrundstrahlung hinterlassen haben. Hierfür gibt es Anzeichen. Eigentlich müsste extrem energiereiche, kurzwellige Strahlung aus sehr weiter Entfernung Effekte hinterlassen oder erst gar nicht beobachtet werden können. Dies wurde aber bisher nicht bestätigt.

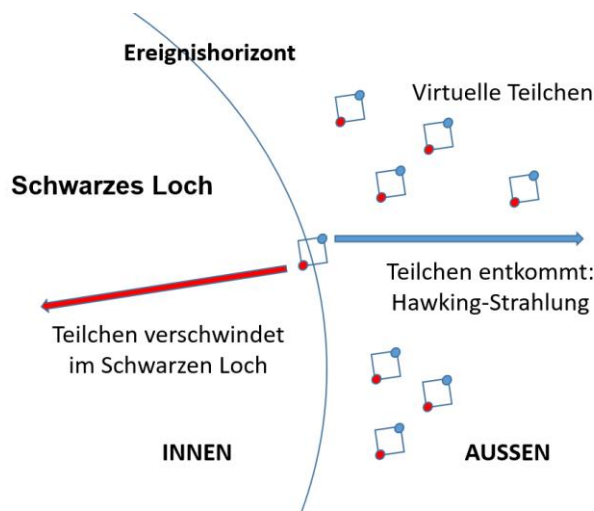


Abb. 18: Schematische Verdeutlichung der Hawking-Strahlung

Gewisse Ähnlichkeiten zur Schleifenquantengravitation hat die Causal Dynamic Triangulation (CDT). Anhand des Namens soll die CDT kurz und plakativ skizziert werden. Ausgangspunkt ist die Tatsache, dass jede planare Fläche in Dreiecke (2-simplex) und höherdimensionale Objekte (3-simplex=Tetraeder, 4-simplex=Pentachoron, etc.),

also in sogenannte „Vereinfachungen“, zerlegt werden kann (Triangulation). Dieses Kalkül¹⁸⁹ wird auch für Näherungslösungen der ART benutzt. CDT scheint im makroskopischen Maßstab der 4-dimensionalen Raumzeit nahe zu kommen. Es zeigt sich aber auch, dass im mikroskopischen Maßstab die Raumzeit in der Nähe der Planck-Skala gemäß der CDT zweidimensional ist. Sie zeigt dort eine fraktale, selbstähnliche Struktur. Die Raumzeit wird durch die Triangulation in diskrete Elemente und in Raumscheiben zerlegt, die eine diskrete Zeitvariable tragen. Diese entsteht, indem in zeitlich gleich verteilten Abschnitten „Werte“ entnommen werden. Damit führt man quasi "grobkörnige" Abschnitte der Raumzeit ein.¹⁹⁰ Das wird in diesem Zusammenhang ebenfalls Triangulation genannt. Man kann über diskrete Zeitwerte integrieren („Feynman Pfadintegral“). In diesem Skalenbereich sollte sich die Struktur der Raumzeit aufgrund von Quantenfluktuationen und topologischen Fluktuationen ständig ändern. Dafür steht der Begriff „dynamic“. Charmant an der CDT ist die Tatsache, dass durch das gewählte theoretische Konstrukt immer die Kausalität gewahrt bleibt („causal“). Die „Dreiecke“ tragen sozusagen einen Zeitpfeil. Es besteht die Hoffnung, dass die CDT ohne weitere Annahmen ein Universum beschreibt, bei dem die kosmologische Konstante verschwindet und das Universum, wie beobachtet, beschleunigt expandiert. Die CDT scheint in

¹⁸⁹ Regge-Kalkül, benannt nach Tullio Regge

¹⁹⁰ Es erinnert wieder an ein „Daumenkino“, in dem jedes Blatt einem diskreten, zeitlichen Schritt entspricht.

kleinsten Skalen nicht körnig zu sein. Die Raumzeit bleibt gemäß dieser Theorie kontinuierlich.

Als eine weitere Theorie soll die „Asymptotische Sicherheit in der Quantengravitation“ (Asymptotic safety in quantum gravity) genannt werden. So ist z.B. die Quantenelektrodynamik (QED) eine bestens bestätigte Theorie, bei der die Renormierung (salopp gesprochen „eliminieren von Unendlichkeiten“) sehr gut funktioniert hat.¹⁹¹ Leider ist die Renormierung, wie sie in der QED angewendet wurde, bei der Quantisierung der Schwerkraft nicht möglich („störende Renormierung“). Es entstehen bei immer höheren Energien unendlich viele Unendlichkeiten und man wird mit unendlich vielen Parametern konfrontiert. Energieabhängigkeit ist in den Naturgesetzen gang und gäbe. Bei der starken Kernkraft führt sie dazu, dass die Bindungskraft zwischen Quarks umso stärker wird, je weiter sie sich voneinander entfernen. D.h. bei hohen Energien wird sie schwächer und ihre Energie abhängige „Kopplungskonstante“ geht schließlich gegen Null. Das ist das Prinzip der „asymptotischen Freiheit“. Bei der Kopplungskonstanten der elektromagnetischen Kraft, der Feinstrukturkonstanten¹⁹², passiert das Gegenteil. Steven Weinberg hat aber festgestellt, dass schwächere Anforderungen ausreichen um die „störende Renormierung“ zu umgehen. Es scheint bei hohen Energien eine endliche Anzahl von Parametern zu genügen. Dies wird als „asymptotische Sicherheit“ bezeichnet. Zentraler mathematischer Bestandteil ist ein nichttrivialer Fixpunkt im sogenannten Renormierungsgruppenfluss, also der Änderung von Energie bzw. Impuls im Quantenfeld unter Berücksichtigung der Unschärferelation. Ab dem Fixpunkt bleibt die Kopplungsstärke auch bei steigender Energie konstant. Dazu sind sozusagen verschiedene Skalenbereiche zu betrachten. Theoretisch kann die Renormierungsgruppe (RG) dazu verwendet werden, einen Sachverhalt in verschiedenen Maßstäben (z.B. unter dem Gesichtspunkt „Maß an Skaleninvarianz bei der Energie“) zu untersuchen und wird auch in anderen Bereichen der Physik eingesetzt (z.B. Phasenübergänge 2. Ordnung). Vorsicht: Im mathematisch/algebraischen Sinn ist die RG keine Gruppe (inverses Element fehlt). Salopp kann man sie als mathematisches „Mikroskop“ bezeichnen. Sie hilft, die Terme zu identifizieren, die auf unterschiedlichen Skalen besonders relevant sind. Bei einer „asymptotisch sicheren“ Theorie ist

¹⁹¹ Shin'ichirō Tomonaga, Julian Schwinger und Richard Feynman nahmen alle problematischen Rechterme in die Definition von Masse und Ladung. Dadurch erhält man den verblüffend genauen, experimentell verifizierbaren Wert für das magnetische Moment von Elektronen. Kenneth Wilson verfeinerte die Methode, indem er Skaleneffekte berücksichtigte.

¹⁹² Sie ist übrigens bei hohen Energien keine Konstante.

sowohl die Anzahl der Parameter als auch ihr Wertebereich endlich.¹⁹³ Eine Quantengravitationstheorie wäre dann asymptotisch sicher, wenn sowohl bei hohen als auch bei niedrigen Energien und Längenbereichen kein „pathologisches“ Verhalten, also keine Divergenzen, auftreten. Die Kopplungsstärke der Gravitation wäre zunächst skalenabhängig, dann konstant.¹⁹⁴ Bemerkenswert ist die Tatsache, dass man mit Hilfe der asymptotischen Sicherheit auch im Bereich der Teilchenphysik die Masse des (erstaunlich leichten) Higgs-Boson fast punktgenau vorhersagen konnte.¹⁹⁵ Wenn sich zeigt, dass die Natur „Asymptotische Sicherheit“ realisiert, gehen die Auswirkungen in alle Bereiche, in denen Quanteneffekte der Schwerkraft auftreten. Hier liegt auch der Bezug zur „Zeit“. Asymptotische Sicherheit wäre von mindestens ähnlicher Bedeutung wie die Asymptotische Freiheit bei der starken Wechselwirkung.¹⁹⁶

In einem interessanten Simulationsmodell erscheint die Raumzeit auf kleinsten Skalen ebenfalls als selbstähnliches Fraktal der Dimension (etwa) zwei (fraktale, nichteuklidische Hausdorff-Dimension). Es ist aber verblüffend, dass die Anzahl an Dimensionen auch vom Maßstab abhängt. Auf großen Skalen ergibt die Simulation die korrekte Dimension der Raumzeit, also vier. Diese Computersimulationen legen das Modell der CDT nahe. Mit erstaunlich wenigen Annahmen, insbesondere der Kausalität, konnte ein Universum simuliert werden, das unserer Welt erstaunlich nahekommt.¹⁹⁷

Man kann insgesamt davon ausgehen, dass die elementaren Bausteine, wie Schleifen oder verallgemeinerte Dreiecke, keine unmittelbare physikalische Bedeutung haben und lediglich die Raumzeit mathematisch handhabbar approximieren. Sie werden als Grenzwert sehr klein oder gehen sogar gegen Null. Ihre Form ist dann nebensächlich. Erst das gemeinsame, kollektive Verhalten im Rahmen des Modells ist die eigentlich relevante physikalische Information.

¹⁹³ Siehe für weiterführende Informationen die externen Links unter https://de.qaz.wiki/wiki/Asymptotic_safety_in_quantum_gravity
Darunter ist ein Vortrag von Steven Weinberg von einem Workshop am CERN am 7. Juli 2009.

¹⁹⁴ Man denke an die berühmte Frage Benoît Mandelbrots: „Wie lang ist die Küstenlinie Großbritanniens?“ Antwort: „Es kommt auf die Auflösung an.“
Siehe Benoît B. Mandelbrot; Die fraktale Geometrie der Natur, Basel, Boston, Birkhäuser 1987, S. 37 f

¹⁹⁵ M. Shaposhnikov, C. Wetterich, Asymptotic safety of gravity and the Higgs boson mass, arXiv:0912.0208v2, Physics Letters B 683, 2010

¹⁹⁶ Siehe auch <https://www.spektrum.de/news/neues-leben-fuer-eine-alte-theorie-von-allem/1568388>

¹⁹⁷ Siehe auch <http://www.schattenblick.de/infopool/natur/physik/npfor599.html>

Nun ist ein vergleichender Blick auf den aktuellen Stand der Theorien sinnvoll und was offenbar die unabdingbaren Merkmale einer künftigen theoretisch konsistenten und experimentell bestätigten Quantengravitation sein müssten.¹⁹⁸ Dazu soll einerseits die Stringtheorie und andererseits davon unabhängige Quantengravitationstheorien beleuchtet werden.

Bei der Stringtheorie kann man nicht von einem mathematisch einheitlichen Gedankengebäude ausgehen, sondern muss von einer Klasse von ähnlichen Ansätzen sprechen. Allen ist jedoch gemeinsam, dass Elementarteilchen nicht punktförmig angesehen werden. Ursprünglich waren es eindimensionale Fäden – daher der Name Stringtheorie. Ein anderer Ansatz sind mehrdimensionale Membranen. Beide Vorgehensweisen vermeiden zwar dadurch die Länge Null, aber führen trotzdem unter gewissen Umständen zu Unendlichkeiten. Man nimmt an, dass diese sich aufheben, was aber nicht bewiesen ist. Sie brauchen mindestens elf Dimensionen, von denen sieben Extradimensionen kompaktifiziert, also „aufgerollt“ sind. Man geht von einer Ausdehnung von 10^{-32} Metern aus, also in etwa der Größenordnung der Planck-Länge. Roger Penrose hat nachgewiesen, dass Objekte dieser Größenordnung nicht stabil sind, sondern extrem schnell zu einem Schwarzen Loch kollabieren.¹⁹⁹ Bisher wurden in Experimenten keine Hinweise auf Extradimensionen gefunden; es gibt nur theoretische Überlegungen. Die Art und Weise der Kompaktifizierung lässt ungeheuer viel Spielraum zu (ca. 10^{500} Möglichkeiten). Dies ist als „Landscape-Problem“ bekannt und repräsentiert auch die mögliche Anzahl an Naturgesetzen bzw. Naturkonstanten. Da die Naturgesetze in unserer Welt sehr gut für die Entstehung von Leben austariert sind, war beim Urknall die Chance, dass in einer zufälligen Ausprägung der Stringtheorie unsere Welt so entstanden ist, wie sie ist, verschwindend gering gewesen. Konzeptionell hat die Stringtheorie kaum Ansätze um die Allgemeine Relativitätstheorie einzubinden. Die Elementarteilchen kann man sehr gut Anregungszuständen der Strings zuordnen, aber die Massen kann sie nicht ohne willkürliche Zusatzannahmen berechnen; ebenso die Feinstrukturkonstante nach Sommerfeld, die deshalb von enormer Bedeutung im ganzen Theoriengebäude ist, weil sie mit den wichtigen Naturkonstanten Elementarladung e , dem Planckschen Wirkungsquantum h , der Lichtgeschwindigkeit c und dazu der elektrischen Feldkonstante ϵ_0 verknüpft ist. Es fehlen fast vollständig Aussagen zu Raum und Zeit. Attraktiv ist die Superstringtheorie, doch leider konnten

¹⁹⁸ Die folgenden Abwägungen zwischen Stringtheorie und Schleifenquantengravitation wurden stark inspiriert von Lutz Gaudig; *Leben wir in einer Illusion?*, Verlag KomplettMedia, München/Grünwald, 2018, S. 193 ff

¹⁹⁹ Man kann auch umgekehrt argumentieren: Um ein Objekt dieser Größe aufzulösen, braucht man Licht von mindestens der halben Wellenlänge. Die Energiedichte wäre so groß, dass sie einem Schwarzen Loch entspricht.

(wider Erwarten) noch keine supersymmetrischen Teilchen am LHC gefunden werden. Ein großer mathematischer Erfolg war der Beweis, dass die 11-dimensionale Supergravitation mit den Superstringtheorien zu einer umfassenden Theorie verbunden werden kann (M-Theorie). Viele Varianten und gänzlichliches Fehlen von experimentellen Hinweisen widersprechen jedoch naturwissenschaftlichen Prinzipien an die Falsifizierbarkeit einer Theorie. Manche Physiker bezweifeln, dass es sich bei der Stringtheorie um eine physikalische Theorie handelt und nicht um ein Teilgebiet der Mathematik.

Während die Stringtheorie die Kräfte vereinheitlicht beschreiben will, haben die Quantengravitationstheorien versucht, die 4-dimensionale Raumzeit (kovarianter Ansatz) oder den 3-dimensionalen Raum (kanonischer Ansatz) zu quantifizieren. Der mathematische Ansatz führt dabei beim Beispiel Schleifenquantengravitation zu kleinen, aber in der Raumzeit stabilen Raumzeitquanten größer der Planck-Länge bzw. -Fläche. Die Elementarteilchen können beschrieben werden; ihre Massen lassen sich nicht berechnen. Die Theorie kann auch bis zum Urknall zurückgehen, wobei keine Singularität entsteht, sondern sämtliche Masse ist etwa auf die Größe eines Protons verdichtet.²⁰⁰ Die Dichte ist riesig, aber nicht unendlich. Allerdings ist es bis jetzt nicht gelungen, dass die Allgemeine Relativitätstheorie in natürlicher Weise als Grenzfall aus der Schleifenquantengravitation hervorgeht. Noch krasser formuliert: Einen harmonischen, stetigen Übergang vom diskreten Spinnnetzwerk in eine kontinuierliche, geometrische Sicht der ART ist schwer vorstellbar. Damit sind auch im Modell Energie und Masse kein integraler Bestandteil der Raumzeit. Das wohl schlimmste Manko teilt die Schleifenquantengravitation mit allen anderen Theorien: Vorhersage und Berechnung der bekannten Teilchen, Naturkonstanten und damit insbesondere der Feinstrukturkonstante sind nicht möglich. Sie müssen nach ihren empirisch gemessenen Werten per Definition in die Theorie integriert werden.

Es ist somit frustrierend, dass bisher keine Theorie den Ursprung von Raum, Zeit, Materie und Energie erklären kann und weshalb es Effekte gibt, die wir mangels besserer Erklärung als Dunkle Materie und Dunkle Energie bezeichnen.

An dieser Stelle ist ein Hinweis auf alternative Gravitationstheorien angebracht. Sie haben allerdings in der Regel keinen Anspruch, Quantengravitationstheorien zu sein. Die Theorie der „Entropischen Gravitation“

²⁰⁰ Hier entstehen eher neue Fragen, denn es muss keinen Urknall geben. Das Universum kann also eine Vorgeschichte haben (big bounce). Die Forschungen von Abhay Ashtekar haben darüber hinaus kosmologische Überlegungen befruchtet und erfolgreiche Beobachtungen und Vorhersagen der kosmischen Hintergrundstrahlung angestoßen.

macht vollkommen deckungsgleiche Vorhersagen wie die Gravitationstheorien von Newton und die ART von Einstein. Sie berücksichtigt aber Quantenfluktuationen. Dadurch nimmt die Gravitationsbeschleunigung nicht mit $1/r^2$, sondern nur mit $1/r$ ab. Die „Entropische Gravitation“ modifiziert dadurch die Gravitationsgesetze und will ohne Dunkle Materie auskommen um die Rotation von Galaxien zu erklären. Streng genommen ist sie ein Aspekt der „Modifizierten newtonschen Dynamik“ (MOND). MOND stellt ebenfalls die Existenz von Dunkler Materie infrage und nimmt an, dass die keplerschen Gesetze für sehr geringe Beschleunigungen nicht exakt gelten.

Es bleibt, das Grundkonzept der heutigen Ansätze zu einer Quantengravitation zu bewerten: Die Raumzeit wird in kleinsten Skalenbereichen beschrieben, es entsteht selbst im Urknall keine Singularität. Spinnnetzwerke, Triangulationen oder Asymptotische Sicherheit sind sehr interessante mathematische Lösungsansätze – mehr nicht. Einen entscheidenden Durchbruch bei der Vereinigung von Quantentheorie und Allgemeiner Relativitätstheorie bieten sie noch nicht vollständig und wir wissen ebenfalls noch nicht, wie die Natur sich verhält.

Der Realitätsbegriff in künftigen Quantengravitationstheorien

Welche Auswirkungen auf unser Realitätsverständnis von Raum und Zeit haben diese Vorstellungen? Es stellt sich bei diesen Grundkonzepten die Frage nach dem Realitätsbezug. Wie soll man sich das vorstellen? Darf man sich das überhaupt vorstellen oder genügt die Mathematik, die Messergebnisse korrekt interpretiert und überprüfbare Voraussagen macht?

Wie immer gibt es Nuancen, aber die entscheidende Frage ist dabei der Standpunkt. Die positivistische Sicht erwartet „...*, dass eine physikalische Theorie nur ein mathematisches Modell darstellt und dass es nicht sinnvoll ist, zu fragen, ob dieses der Realität entspricht.*“²⁰¹ Noch drastischer formuliert: „*Ich verlange nicht, dass die Theorie sich mit der Realität deckt, weil ich nicht weiß, was das ist. ... Mich interessiert nur, dass die Theorie Messergebnisse vorhersagt.*“²⁰²

Diese mathematisch-logische Interpretation aus der Sicht von Stephen Hawking ist erst zu Beginn des 20. Jahrhunderts durch die Erfolge in den Naturwissenschaften entstanden.²⁰³ Es gehört ein gewisses Maß an

²⁰¹ Stephen Hawking, in Stephen Hawking, Roger Penrose, Raum und Zeit, Rowohlt, 1998, S. 10

²⁰² Stephen Hawking, zitiert nach Jim Holt; Als Einstein und Gödel spazieren gingen, Rowohlt, Hamburg, April 2020, S. 331

²⁰³ Siehe dazu: Karl Sigmund; Sie nannten sich Der Wiener Kreis, Springer. 2. wesentlich erweiterte Ausgabe, 2018

Selbstdisziplin dazu, sich auf diese Sicht zu beschränken. Bei der Frage nach der „wahren“ Realität“ überwiegt doch oft, jenseits aller philosophischen Auffassungen, das Bedürfnis nach Anschaulichkeit. Dazu gehören auch vertraute logische Rahmenbedingungen, wie der Determinismus. Das mathematische Modell wird zwar bejahend zur Kenntnis genommen, aber es wird die Frage nach der „materiellen Außenwelt“ gestellt, wenn schon nicht in Form von Sinneswahrnehmungen, so doch in Form von Vorstellungen, die sinnliche Bezüge darstellen. Die Sprache ist dabei Mittel zum Zweck. Begriffe, wie „Körnigkeit“, „Granularität“ bilden die Brücke zu diesen Vorstellungen, sind aber nicht allen Modellen gemeinsam. Ein „je ne sais quoi“ („ich weiß nicht, was“) wird nicht akzeptiert. In der Tat erinnert die Situation an die Entstehung und Interpretation der Quantenmechanik, insbesondere als Matrizenmechanik und Wellenmechanik und dann Determinismus und Indeterminismus um die Deutungshoheit rangen. So musste zwar der Zusammenstoß zweier Teilchen quantenmechanisch beschrieben werden und hatte auch nicht-klassische Konsequenzen (z.B. Compton-Effekt). Aber dann musste jedes Teilchen irgendwo „sein“, auch wenn dieser „Ort“ prinzipiell nicht genau bestimmbar ist und der Welle/Teilchen-Dualismus erst recht eine genaue „Identifizierung“ verhindert. So entstand durch Max Born der elegante Schluss der Aufenthaltswahrscheinlichkeiten, der bei aller Neuheit in der Physik immerhin einen Realitätsbezug ermöglichte – auch wenn der bornsche Gedanke erst sehr spät gewürdigt wurde. Er selber schrieb später: *„Vom Standpunkt unserer Quantenmechanik gibt es keine Größe, die im Einzelfall den Effekt eines Stoßes kausal festlegt. Ich selber neige dazu, die Determiniertheit in der atomaren Welt aufzugeben.“*²⁰⁴ Max Planck vertrat die Gegenposition und war sich darin mit Einstein einig. Die heisenbergsche Unbestimmtheit nannte er *„Unsicherheit“* und als etwas *„ganz Unerhörtes.“*²⁰⁵ Einstein schrieb an Born die berühmten Worte: *„Die Quantenmechanik ist sehr achtunggebietend. Aber eine innere Stimme sagt mir, dass das noch nicht der wahre Jakob ist. Die Theorie liefert viel, aber dem Geheimnis des Alten bringt er uns kaum näher. Jedenfalls bin ich überzeugt, dass der nicht würfelt.“*²⁰⁶ Mittlerweile wissen wir, dass die Quantentheorie auch bei „extremen“ Voraussagen immer wieder bestätigt wird. Das Gleiche gilt aber auch für die Allgemeine Relativitätstheorie. Darauf muss eine umfassende Theorie Antworten geben und es ist die Frage, ob dabei die Forderung nach Gegenständlichkeit, gesundem Menschenverstand,

²⁰⁴ Zitiert nach David Lindley, Die Unbestimmtheit der Welt, DVA, München, 2008, S. 171

²⁰⁵ Zitiert nach Ernst Peter Fischer, Der Physiker – Max Planck und das Zerfallen der Welt, Pantheon, 1. Auflage 2010, S. 167

²⁰⁶ Zitiert nach David Lindley, Die Unbestimmtheit der Welt, ebenda, S. 171

Determinismus oder Kausalität nicht genau so aufgegeben werden muss, wie die zu Grunde liegenden Basistheorien dies schon tun mussten.

Ist eine Quantengravitation in den vorliegenden Theorien also die Beschreibung der Realität oder ist es ein mathematisches Modell, um die Naturgesetze zu formulieren ohne den Anspruch, damit Wirklichkeit beschreiben zu wollen bzw. zu können?

Ein Blick in die Wissenschaftsgeschichte oder besser, in die philosophische Interpretation der Realität, kann dabei helfen, diese Frage zu erörtern.

Im Jahr 1927 entwickelten Niels Bohr und Werner Heisenberg die sogenannte „Kopenhagener Deutung oder Interpretation“ der Quantenmechanik. Da Raum- bzw. Raumzeitquanten, wenn nicht Objekte, so zumindest quantenmechanische Untersuchungsgegenstände sind, lassen sich einige Aspekte übertragen und auf den Realitätsbegriff der Quantengravitation anwenden. Im Fall der Kopenhagener Deutung haben quantenmechanische Objekte (im Rahmen des Formalismus) keine Realität im allgemeinen Sinne. Im hawkingischen Sinne ist die Kopenhagener Deutung positivistisch und stellt eine philosophische Sichtweise auf die Quantenmechanik dar. Wegen des Nicht-Determinismus wird sie von Vertretern der Gegenposition als unvollständig angesehen.²⁰⁷ Es ist aber eine vollständige mathematische Beschreibung der Quantenmechanik und ihres nicht-deterministischen Charakters. Die Messergebnisse sind aus Prinzip nicht vorhersagbar. Verborgene Variable können ausgeschlossen werden (Stichwort Bell'sche Ungleichung). Nur die sehr genaue Wahrscheinlichkeitsverteilung ist vorhersehbar und die Tatsache, dass Quanten meist nur durch komplementäre Eigenschaften in getrennten Messungen charakterisiert werden können. Zentraler Begriff bei Bohr ist die Komplementarität. Quantensysteme sind ganzheitlich/holistisch zu betrachten, sind aber entweder prinzipiell (radikale Sicht Bohr) oder einfach messtechnisch nur teilweise beobachtbar (moderate Sicht von Heisenberg).²⁰⁸ Wir sehen somit immer nur einen Aspekt der beschreibbaren „Realität“ oder, je nach philosophischem Standpunkt und Sichtweise, des mathematischen Modells. Dazu gehören praktische Fragen wie nicht gleichzeitig durchführbare Orts-/Impulsmessungen oder etwa die Komplementarität beim Wellen- bzw. Teilchencharakter von Quantenobjekten. Bohr und Heisenberg wollten darüber hinaus mit der Kopenhagener Deutung darauf reagieren, dass in der Quantenmechanik Objekte nicht unabhängig von der Beobachtung existieren

²⁰⁷ Siehe Albert Einsteins Kritik, oft verkürzt zitiert in „Gott würfelt nicht.“

²⁰⁸ Heisenberg deutet sie epistemisch (erkenntnistheoretisch). Die Unbestimmtheit liegt am Erkennenden, also am Messenden bzw. am Messprozess. Bohr interpretiert ontologisch, also nach dem Maß an beschränktem Wissen über die Realität bzw. dem, was wir von der Natur prinzipiell wissen können.

und es somit keine eindeutige Vergangenheit der Objekte gibt.²⁰⁹ Einstein wollte dies nicht akzeptieren: „*Der Mond ist da, auch wenn keiner hinschaut.*“²¹⁰ Das bleibt auf makroskopischer Ebene unbestritten. Viele Experimente haben jedoch bei Quantenobjekten bestätigt, dass erst die bewusste Beobachtung einen Zustand definiert. Das zeigen sogar einfache Versuche, wie das Doppelspalt-Experiment und seine Varianten. Noch wichtigere Bedeutung für das neue Bild der Realität hatte damals wie heute insbesondere die quantenmechanische Verschränkung. Zwei oder mehr verschränkte „Teilchen“ büßen ihre Individualität ein, weil sie komplett ununterscheidbar sind, das System sich als unteilbares Ganzes verhält und die Messung an einem Teilchen instantan, also ohne Zeitverzug, den Zustand des anderen Teilchens bestimmt.²¹¹ Reden wir hier nicht besser bei der Verschränkung von einem primären Merkmal und bei dem Teilchenbegriff von einem sekundären Merkmal?

Doch bei den kleinsten Strukturen kann man nicht ohne weiteres von Teilchen sprechen – es sei denn, man fasst den Begriff ontologisch auf, denn Denken und Erkennen enthält immer ein „Etwas“ mit einem „Seinsanspruch“. Kann also die Relation, die z.B. in Form von Spinnnetzwerken oder Triangulationen zwischen den Schnittstellen z.B. der Schleifen besteht, ohne „feste, teilchenförmige Objekte“ existieren, die erst diese Relation miteinander verbinden würde? Kann eine Eigenschaft überhaupt unabhängig von Objekten existieren? Können wir akzeptieren, dass die mathematische Beschreibung als Syntax ohne physikalisch/sinnliche Entsprechung als Semantik in Form eines beobachtbaren Objekts eine Bedeutung hat?²¹²

Allerdings hat sich auch der Begriff „Teilchen“ als Objekt gewandelt. Teilchen haben z.B. sowohl Korpuskel- als auch Wellencharakter und das in jeder beliebigen Größe, auch für Erde oder Mond. Das ist die Erkenntnis von Louis de Broglie. Nur in zunehmend makroskopischen Dimensionen überwiegt der

²⁰⁹ Siehe dazu Lutz Gaudig; *Leben wir in einer Illusion?*, Verlag KompletMedia, München/Grünwald, 2018, S. 170 ff

²¹⁰ Albert Einstein, *Briefe an Maurice Solovine*, Briefe an Maurice Solovine Faksimile-Wiedergabe von Briefen aus den Jahren 1906 bis 1955

VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, 1960, zitiert nach Gaudig, ebenda, S. 175

²¹¹ Verschränkte Teilchen werden mit Wurmlochern in Verbindung gebracht:

<https://www.astropage.eu/2013/12/05/spukhafte-fernwirkung-baut-moeglicherweise-ein-wurmloch-zwischen-verschraenkten-teilchen-auf/>

²¹² Einstein hatte damit immer Probleme, auch wenn er sich in diesem Fall korrigieren musste. "Ihre Berechnungen sind korrekt, aber Ihr Verständnis von Physik ist scheußlich." Albert Einstein zu Georges Lemaître, Oktober 1927, 5. Solvay-Konferenz Brüssel, Bezug: Lemaîtres Urknall-Modell eines expandierenden Universums, in dem er die Kosmologische Konstante in den Gleichungen der ART auf Null setzte.

Korpuskularcharakter, weil die Wellenlänge des Objektes immer kleiner wird.²¹³ Teilchen können aber auch Anregungen eines Quantenfeldes sein und dann verschwimmt die Grenze zwischen Feld und Teilchen. Sie wären dann im Falle der Gravitation extrem schwer und deshalb praktisch auf der Erde nicht nachweisbar. Um die Theorie einer Quantengravitation zu überprüfen, muss man nach anderen beobachtbaren Effekten suchen. Es muss gezeigt werden, dass es über Effekte hinaus Objekte, in denen sich diese Effekte manifestieren, eben die Raumzeitkörnchen als Quanten, überhaupt gibt. Möglicherweise ist es eine künstliche Unterscheidung, wenn man zwischen Teilchen und (mathematischen) Eigenschaften differenziert. Im Leitartikel der Zeitschrift „Spektrum der Wissenschaft“ diskutierte die Wissenschaftsjournalistin Natalie Wolchover verschiedene Definitionen von Elementarteilchen (also als punktförmig angenommene Teilchen, ohne Substruktur bzw. räumliche Ausdehnung):²¹⁴

Ein Teilchen ist eine kollabierte Wellenfunktion

Ein Teilchen ist die Anregung eines Feldes

Ein Teilchen ist die irreduzible Darstellung einer Symmetriegruppe

Ein Teilchen ist ein Satz von Quantenzahlen im Standardmodell

Ein Teilchen ist ein schwingender String

Ein Teilchen ist ein „It from Qubit“

Ein Teilchen ist ein Click im Detektor

Dies ist eine bunte Palette von etablierten oder spekulativen Theorien, wie etwa der ursprünglichen Quanten(wellen)mechanik, der Quantenfeldtheorie, der klassischen Poincaré-Gruppe mit den 10 Freiheitsgraden, der Gruppenstruktur $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ des Standardmodells, der Stringtheorie, der quantisierten Informationstheorie und aus der experimentellen Sicht. Wahrscheinlich findet man noch weitere Sichtweisen.

In seinem Artikel „Was ist real?“ diskutiert Meinard Kuhlmann den aktuellen Stand der philosophischen Forschung im Rahmen der Arbeitsgemeinschaft „Philosophie der Physik“ der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, deren Vorsitzender er ist. Er schreibt: „... *Grundbestandteile der Welt könnten weder Teilchen noch Felder, sondern bestimmte Strukturen oder Bündel von Eigenschaften [sein]. Ein Teilchen ist das, was man bekommt, wenn diese*

²¹³ Die de Broglie Wellenlänge $\lambda = \frac{h}{p}$, wobei h das plancksche Wirkungsquantum und p der Impuls ist.

²¹⁴ Spektrum der Wissenschaft, 4.21, S.12 ff (hier plakativ vereinfacht dargestellt)

*Eigenschaften sich auf besondere Weise bündeln.*²¹⁵ Das ist ein Plädoyer für die Effekte und weg vom Teilchenbegriff mit seinem Realitätsbezug.

Doch zunächst sollte man nicht zu viel verlangen. Ein schlüssiger, experimenteller Nachweis auf eine konsistente Theorie wäre der erste Schritt. Es gehört zu den Forderungen des Positivismus nach dem Primat der unmittelbaren Erfahrung durch Experiment und Messung. In der Wissenschaft ist insbesondere seit Entstehung der Quantenphysik eine Reduktion der Theorie auf unmittelbare sinnliche Erlebnisse jedoch nicht immer möglich. Was aber möglich sein muss, ist die Forderung, dass man nur beobachtbare Größen betrachtet - auch wenn diese nur unterschiedliche bzw. komplementäre physikalische Sichten erlauben. Dann kann man diese Erkenntnisse auf den Realitätsbegriff in unterschiedlichen philosophischen Sichten anwenden. Um mit Richard Feynman zu sprechen: „*Offensichtlich ist es gar nicht so leicht zu entscheiden, ob man sich um die Philosophie hinter den Ideen kümmern soll oder nicht.*“²¹⁶ Schon die Ideenlehre bei Platon hat zwischen einer unveränderlichen, körperlosen Idee und einer körperbehafteten, dinglichen und

vergänglichen, gegenständlichen Welt unterschieden. Die Ideen und nicht die Objekte der Sinneswahrnehmung sind bei Platon die eigentliche Realität.²¹⁷

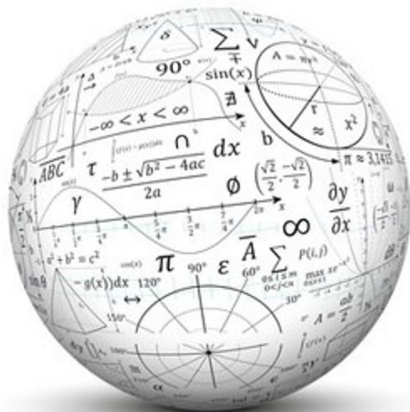


Abb. 19:
REALITY LOST IN MATH?

Doch in der Naturwissenschaft zählt vor allem die Beobachtung. Einstein hat nie geglaubt, dass sich Gravitationswellen nachweisen lassen. Er hat sie postuliert, aber erst ein Nachweis ist ein Beweis. Schließlich wurden sie zuerst indirekt beobachtet und haben heute ein neues Fenster zum Kosmos eröffnet. Schwarze Löcher hat man bereits prinzipiell indirekt „gesehen“. Auch der Wettstreit der Gravitationstheorien wird im

Labor bzw. durch Beobachtung entschieden werden. Erste ausgeklügelte Experimente werden bereits konzipiert.²¹⁸

²¹⁵ Spektrum der Wissenschaft Spezial: Physik-Mathematik-Technik 1/15, zitiert nach Gaudig, ebenda S. 173

²¹⁶ Richard P. Feynman, Vom Wesen physikalischer Gesetze, Piper, München, ungekürzte Taschenbuchauflage, S. 208

²¹⁷ Bildquelle <https://www.mathematik.hu-berlin.de/de/tdm-2017/>;

Lizenz CC BY-SA 4.0, Anspielung auf einen Buchtitel von Sabine Hossenfelder

²¹⁸ Siehe eine Reihe von Beiträgen in Spektrum der Wissenschaft – Highlights, 3.20 (März 2020), Quantengravitation; zum vorgeschlagenen Experiment mit

Es ist vor allem ein neues Bild, eine „Idee“ des Raumes und der Zeit im platonischen Sinne erforderlich. Dieses Bild muss als plausible, belastbare Vorstellung in den Köpfen durch experimentelle Indizien gebildet werden und darf dem mathematischen Modell nicht widersprechen. Neben den Indizien, hat die Konsistenz der Mathematik unbedingte Priorität. Wenn die Vorstellungskraft versagt, ist das mathematische Modell das Einzige, was bleibt. Unabdingbare Voraussetzung sind aber immer experimentelle Belege oder Beobachtungen für die Richtigkeit des Modells.

Als erklärter Schüler von Ernst Mach war Einstein Empiriker. Doch auch er leugnete nicht den Sinn der positivistischen Sicht:

Die eigentliche Schwierigkeit liegt darin, dass die Physik eine Art Metaphysik ist: Physik beschreibt "Wirklichkeit". Aber wir wissen nicht, was "Wirklichkeit" ist; wir kennen sie nur durch die physikalische Beschreibung!²¹⁹

Es ist zu hoffen, dass künftige Experimente sowohl phänomenologische wie auch ausreichend formalistische Ansatzpunkte liefern, um uns ein „Bild“ von der Welt und der Zeit in kleinsten Skalen zu machen.

Die Frage nach der eigentlichen Natur von Realität in Raum und Zeit und damit in einer weiterentwickelten Theorie der Gravitation wird den Realitätsbegriff wohl neu interpretieren und vielleicht sogar verändern müssen.

Fazit

Man muss zwischen Zeitmessung und Zeitmentalität unterscheiden. Die Geschichte der Zeitmessung lässt sich bis zu 5.000 Jahre zurückverfolgen. Doch bei der Zeitmentalität mussten die Menschen bis über das vorindustrielle Zeitalter hinaus für ihr Tagwerk und für den Jahresverlauf nur in größeren Zeitintervallen denken. Durch Himmelsbeobachtungen wurden von Astronomen sehr genaue Kalender, auch vor dem heliozentrischen Weltbild, entwickelt. Erst mit Beginn des Spätmittelalters kamen mechanische Uhren auf. Technologischer Durchbruch brachte u.a. die Pendeluhr und es änderte sich langsam und eher zeitversetzt zur Technik die Zeitmentalität. Durch größere Mobilität wurde es schließlich im 19. Jahrhundert nötig, Zeit überregional, national und schließlich international durch die Weltzeit und dem Nullmeridian durch Greenwich zu harmonisieren und weltweit zu organisieren. Wissenschaftlich waren schon in babylonischer Zeit oder der Antike genaue Beobachtungen des Himmels Gegenstand von Zeitmessungen. Erst mit Galilei

Mikrodiamanten in Superposition siehe speziell Natalie Wolchover, Ein Stückchen Schwerkraft, S. 28 f

²¹⁹ Einstein an Schroedinger, 19. Juni 1935

Zitiert nach von Wallwitz, ebenda, S. 169

wurde die Zeit als Parameter in Gesetzen der Dynamik experimentell für die Naturwissenschaft auch auf der Erde wichtig. Newton postulierte die überall gleich fließende Zeit (und den unabhängig von den Dingen existierenden, absoluten Raum) um seine bahnbrechenden Gesetze formulieren zu können. Diese Auffassung setzte sich nicht zuletzt durch den fundamentalen Erkenntnisgewinn gegen andere Ansichten (z.B. von Leibniz) durch. Ende des 19. Jahrhunderts haben wichtige Philosophen, Mathematiker und Physiker einzelne Beiträge geliefert, die Albert Einstein inspiriert haben. In einer großen intellektuellen Leistung hat er dann zuerst für ruhende bzw. gleichförmige Bewegungen in Inertialsystemen und zehn Jahre später für beschleunigte Bewegungen, inklusive der Gravitation, das Zeit- und Raumverständnis durch die Spezielle und Allgemeine Relativitätstheorie radikal verändert. Zur gleichen Zeit wurde die Quantenmechanik entwickelt, die sich auf kleinen Skalen zur zweiten großen Theorie zur Beschreibung der Welt etabliert hat. Es ist bisher noch nicht gelungen, beide Theorien zu einer Theorie der Quantengravitation zu vereinen und diese experimentell oder durch Beobachtungen zu bestätigen. Es gibt allerdings teilweise weit fortgeschrittene, theoretische Überlegungen. Ziel ist, wie der Name schon sagt, eine Quantisierung der Raumzeit. Je nach Theorie, kann sie evtl. auf den kleinsten Skalen nicht als stetig angenommen werden und wäre ab einer gewissen Grenze nicht mehr teilbar – was auch immer das für unser Empfinden von der wahren Wirklichkeit der Natur bedeutet.

Man schreibt Bertrand Russell die Frage zu:

*Ähneln die Realität eher einem Haufen Sand oder einem Eimer Sirup?*²²⁰

Angesichts alternativer Theorien muss es zunächst offenbleiben, ob Raum, Zeit (und Materie) beliebig teilbar sind.

Literaturhinweise

Blaise, Clark; Die Zähmung der Zeit, Fischer Verlag, Frankfurt am Main, 2004

Eddington, Arthur Stanley; Das Weltbild der Physik und ein Versuch einer philosophischen Deutung, Englisch 1928, in Deutsch 1931, Springer Verlag

Einstein, Albert; Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie, Vieweg, 23. Auflage 1988

Elias, Norbert; Über die Zeit, Suhrkamp Taschenbuch Wissenschaft 756, 1. Auflage, 1988

²²⁰ Jim Holt, ebenda, S.232

Farmelo, Graham; Der seltsamste Mensch, Springer Nature 2016, 2. Auflage 2018

Feynman, Richard P.; Vom Wesen physikalischer Gesetze, PIPER, 11. Auflage, Juli 2010

Filk, Thomas; Giulini, Domenico; Am Anfang war die Ewigkeit, C.H.Beck, München, 2004

Filk, Thomas; Modelle von Raum und Zeit, Skript zur Vorlesung, Wintersemester 2010/11 an der Universität Freiburg (Version vom 21. Dezember 2011), http://www.mathphys.uni-freiburg.de/physik/filk/public_html/Skripte/Texte/Raumzeit.pdf

Finster, Reinhard; Van den Heuvel, Gerd; Gottfried Wilhelm Leibniz, rororo Monografien, Reinbek bei Hamburg, 2016, Oktober 1990

Fischer, Ernst Peter; Der Physiker – Max Planck und das Zerfallen der Welt, Pantheon, 1. Auflage 2010

Fölsing, Albrecht; Albert Einstein, Suhrkamp, 2. Auflage 1993

Friebe, Cord; Kuhlmann, Meinard; Lyre, Holger; Näger, Paul; Passon, Oliver; Stöckler, Manfred; Philosophie der Quantenphysik, Springer Spektrum, Heidelberg 2015

Galison, Peter; Einsteins Uhren, Poincarés Karten, S. Fischer, Frankfurt am Main 2003

Gaudig, Lutz; Leben wir in einer Illusion?, Verlag KompletMedia, München/Grünwald, 2018

Genz, Henning; Wie die Naturgesetze Wirklichkeit erschaffen, Hanser, München Wien, 2002

Gleick, James; Isaac Newton, in Deutsch, Albatros (Patmos Gruppe), Düsseldorf, 2009

Hawking, Stephen; Eine kurze Geschichte der Zeit, Rowoldt, Reinbek bei Hamburg 1989

Hawking, Stephen; Penrose, Roger; Raum und Zeit, Rowohlt 1998

Holt, Jim; Als Einstein und Gödel spazieren gingen, Rowohlt, Hamburg, April 2020

Holz, Hans Heinz; Gottfried Wilhelm Leibniz, Reihe Campus, Einführungen, Band 1052, Frankfurt/New York, 1992

Hossenfelder, Sabine; Das häßliche Universum, S. Fischer, 2018

Lenz, Hans; Universalgeschichte der Zeit, marixverlag, Wiesbaden, 2005

Levine, Robert V.; Eine Landkarte der Zeit: wie Kulturen mit Zeit umgehen, Piper, München/Berlin, 1999, ungekürzte Taschenbuchausgabe

Lindley, David; Die Unbestimmtheit der Welt, DVA, München, 2008

Mandelbrot, Benoît B., Die fraktale Geometrie der Natur, Basel, Boston, Birkhäuser 1987

Mittelstaedt, Peter; Philosophische Probleme der modernen Physik, BI Hochschultaschenbücher Band 50, 4. Auflage, Mannheim, 1972

Muller, Richard A.; JETZT – Die Physik der Zeit, deutsche Ausgabe S. Fischer Verlag, Frankfurt am Main, 2018

Murdin, Paul; Die Kartenmacher, deutsch bei Artemis&Winkler, Mannheim, 2010

Neffe, Jürgen; Einstein, rororo, 4. Auflage, Reinbek bei Hamburg, Juli 2009

Padova, Thomas de; Leibniz, Newton und die Erfindung der Zeit, Piper Verlag, München/Berlin 2014

Penrose, Roger; Der Weg zur Wirklichkeit, Teilübersetzung, Vintage (Random House Group), 2005

Penrose, Roger; Zyklen der Zeit, Springer Spektrum, 2011, Softcover Ausgabe 2013

Rovelli, Carlo; Die Ordnung der Zeit, Rowohlt, Reinbek bei Hamburg, 2018

Rovelli, Carlo; Sieben kurze Lektionen über Physik, Rowohlt, 1. Deutsche Auflage, Reinbek bei Hamburg, 2018

Rovelli, Carlo; Und wenn es keine Zeit gäbe? Rowohlt, 1. Deutsche Auflage, Reinbek bei Hamburg, 2019

Rovelli, Carlo; Die Wirklichkeit, die nicht so ist, wie sie scheint, Rowohlt, 1. Deutsche Auflage, Reinbek bei Hamburg, 2016

Ruhrländer, Michael; Aufstieg zu den Einsteingleichungen, Pro Business, Berlin 2014

Russo, Lucio; Die vergessene Revolution oder die Wiedergeburt des antiken Wissens, dt. Ausgabe Springer, Sept. 2003

Schwichtenberg, Jakob; Durch Symmetrie die moderne Physik verstehen, Springer Spektrum, Berlin 2017

Sigmund, Karl; Sie nannten sich Der Wiener Kreis, Springer. 2. wesentlich erweiterte Ausgabe, 2018

Smolin, Lee; Im Universum der Zeit, Deutsche Verlagsanstalt, 2014

- Smolin, Lee; Quantenwelt, Deutsche Verlagsanstalt, 2019
- Sobel, Dava; Längengrad, Berlin Verlag, 1999, 3. Auflage 2002
- Specht, Rainer; Descartes, rororo Monografien, Reinbek bei Hamburg, Juni 1966
- Spektrum der Wissenschaft – Highlights, 3.20 (März 2020), Quantengravitation
- Susskind, Leonhard; Der Krieg um das Schwarze Loch, Suhrkamp, Berlin 2010
- Susskind, Leonhard; Friedman, Art; Quantenmechanik – Das theoretische Minimum, Springer, 2020
- Susskind, Leonhard; Friedman, Art; Elektrodynamik und Relativität – Das theoretische Minimum, Springer, 2020
- Thorne, Kip S.; Gekrümmter Raum und verbogene Zeit, Droemer Knauer, München, 1994
- Unzicker, Alexander; Die mathematische Realität, Selbstverlag 2019, korrigierter Nachdruck 2020/10
- Unzicker, Alexander; Einsteins verlorener Schlüssel, Selbstverlag 2015
- Vaas, Rüdiger; Jenseits von Einsteins Universum, Kosmos, 2015, Stuttgart
- Weizsäcker, Carl Friedrich von; Große Physiker, Carl Hanser, München Wien 1999
- Weizsäcker, Carl Friedrich von; Zum Weltbild der Physik, S. Hirzel, Stuttgart, 13. Auflage
- Wheeler, John Archibald; The Search for Links, posthum neu veröffentlicht in <https://philpapers.org/archive/WHEIPQ.pdf>

Abbildungsnachweise:

- Abb. 1 Sonnenuhr in Jaipur/Indien, eigenes Foto
- Abb. 2 <https://watch-wiki.org/index.php?title=Datei:Revolutionsuhr.jpg>
- Abb. 3 https://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/fachabteilungen/abteilung_4/Wie_funktioniert_eine_Atomuhr_new.pdf, mit freundlicher Genehmigung von Dr. Andreas Bauch, AG-Leiter 4.4, Zeit und Frequenz
- Abb. 4 https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/fb/ZodiacCC_-_Degrees_Dates_Names_Move_DE.svg
- Abb. 5 https://en.wikipedia.org/wiki/Postage_stamps_and_postal_history_of_Canada

- Abb. 6 [https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Standard_Time_Zones_of_the_World_\(October_2015\).svg](https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Standard_Time_Zones_of_the_World_(October_2015).svg)
- Abb. 7 Quelle der Abbildung: https://de.wikipedia.org/wiki/Galileo_Galilei
- Abb. 8 Galileo Galilei, Il Saggiatore, Rom 1623
zitiert nach https://de.wikipedia.org/wiki/Galileo_Galilei
- Abb. 9 https://de.wikipedia.org/wiki/Arthur_St Stanley_Eddington
- Abb. 10 Isaac Newton, Philosophiae Naturalis Principia Mathematica, London 1687 digitalisiert <https://gdz.sub.uni-goettingen.de/id/PPN512261393?tify=%7B%22pages%22:%5B35%5D%7D>
von SUB Göttinger Digitalisierungszentrum, ein Service der SUB Göttingen
- Abb. 11 Isaac Newton porträtiert von Godfrey Kneller, London 1702
Quelle https://de.wikipedia.org/wiki/Isaac_Newton#/media/Datei:Sir_Isaac_Newton_by_Sir_Godfrey_Kneller,_Bt.jpg
- Abb. 12 Quelle: [https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Gottfried_Wilhelm_Leibniz_\(1\).jpg](https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Gottfried_Wilhelm_Leibniz_(1).jpg)
- Abb. 13 https://de.wikipedia.org/wiki/Albert_Einstein#/media/Datei:Einstein_1921_portrait2.jpg
- Abb. 14 Quelle der Grafik: <https://de.wikipedia.org/wiki/Lichtkegel>
- Abb. 15 Schlagzeile der New York Times vom 10. November 1919
- Abb. 16 Vom Autor abgewandelt erstellt nach einer Grafik unter https://de.wikipedia.org/wiki/Große_vereinheitlichte_Theorie
- Abb. 17 Die Grafik wurde erstellt von Daniela Leitner und Markus Pössel von Einstein-Online, dem Webangebot des Max-Planck-Instituts für Gravitationsphysik. Abdruck mit freundlicher Genehmigung von Frau Dr. Elke Müller, Wissenschaftskoordination und Öffentlichkeitsarbeit, Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik (Albert-Einstein-Institut). Potsdam.
<https://www.einstein-online.info/spotlight/spinnetzwerke/>
- Abb. 18 Eigene Grafik, inspiriert von <https://www.faz.net/aktuell/wissen/physik-mehr/experimentelle-quantengravitation-14514580/hawking-strahlung-oben-kann-14514281.htm>
- Abb. 19 Bildquelle <https://www.mathematik.hu-berlin.de/de/tdm-2017/>;
Lizenz CC BY-SA 4.0

Danksagung

Herr Privatdozent Dr. Bernd-Jochen Schaefer hat trotz der Mehrbelastungen durch die Corona-Pandemie in Lehre und Forschung Zeit und Muße für die Unterstützung gefunden. Seine Hinweise waren besonders für die neueren

Forschungsthemen sehr hilfreich, die ich dadurch in den Beitrag noch aufnehmen konnte. Ich bin ihm für seine Rolle als Mentor sehr dankbar.

Herr Dr. Michael Serafin ist gerade in einer Zeit, in der pandemiebedingt keine Veranstaltungen organisiert werden können, für mich der Ansprechpartner schlechthin in unserer altehrwürdigen Gesellschaft. Wie immer hat er auf seine unspektakuläre Art mit Rat und Tat geholfen und hat dafür gesorgt, dass auch ohne Vorträge oder Exkursionen das Vereinsleben weitergeht.