

Für den neuen Präsidenten
der Arnold-Sommerfeld-Gesellschaft
mit allen guten Wünschen! Karl-Peter Dostal

$$x' = (x-vt) \cdot (1-v^2/c^2)^{-1/2} \quad E = m \cdot c^2 \quad m = m_0 \cdot (1-v^2/c^2)^{-1/2} \quad t' = (t-vx/c^2) \cdot (1-v^2/c^2)^{-1/2}$$

Zum 100-jährigen Jubiläum:

Einige Grundlagen und Bestätigungen der allgemeinen Relativitätstheorie

Karl-Peter Dostal

2016

(Vortrags-Präsentation)

Inhalt

Vorgeschichte und Geschichte

Biographisches zu Einstein

Aspekte der speziellen Relativitätstheorie

Motivation und Zielstellung Einsteins

Kurzfassung der Ergebnisse von 1915

Einzelne Aussagen und deren Bestätigungen von 1909 bis 2016

Abschließende Bemerkungen

$$c_{\text{vak}} = 300\,000 \text{ km/s}$$

$$R_{ik} - \frac{1}{2} g_{ik} R = \kappa T_{ik}$$

$$\kappa = 8\pi G/c^4$$

Stadien der Physikgeschichte

- 6. Jh. v. u. Z. (Vorsokratiker) bis um 1600 u. Z.: lange Vorgeschichte.
- Um 1600 bis 1687: Herausbildung der klassischen Physik.
- 1687 bis 1895: Klassische Physik (Newton: *Phil. Naturalis Principia Math.*).
- 1895 bis 1905: Neue Perspektiven durch grundlegende Entdeckungen.
- Ab 1905 moderne Physik, also im Wesentlichen die Physik des 20. Jh.

Das Jahrzehnt 1895 - 1905

- 1895 Jean Baptiste Perrin: Katodenstrahlen bestehen aus negativen Teilchen.
- 1895 Wilhelm Conrad Röntgen: Entdeckung der Röntgenstrahlen.
- 1896 Henri Becquerel: Entdeckung der Radioaktivität.
- 1896 Pieter Zeeman: Entdeckung des Zeemaneffekts.
- 1897 Joseph John Thomson: Entdeckung des Elektrons.
- 1898 Marie Curie: Entdeckung von Radium und Polonium, Begriff „Radioaktivität“.
- 1900 Max Planck: Entdeckung planckschen Strahlungsgesetzes, Quantenhypothese.
- 1900 Ernest Rutherford: Entdeckung des Zerfallsgesetzes der Radioaktivität.
- 1894 - 1900: William Ramsey: Entdeckung aller natürlichen Edelgase.
- 1898 - 1904: Erste Atommodelle von J. J. Thomson, Perrin, Lenard und Nagaoka.
- 1895 - 1906: Wichtige Grundlagen der drahtlosen Nachrichtenübertragung.
- 1905 - Egon von Schweidler: Statistische Deutung des Zerfallsgesetzes.
- **1905 Einsteins „Wunderjahr, *annus mirabilis*“.**

Albert Einstein: frühe Jahre

1879, 14. März, geboren in Ulm.

1880, Juni, Umzug nach München.

1896 Matura und Studienbeginn in Zürich (Polytechnikum), 1900 Diplom.

1901 Schweizer Staatsbürger. Tätigkeit als Lehrer.

1902 Beginn seiner Anstellung am Berner Patentamt (bis 1908).

1903 Heirat mit seiner Kommilitonin Mileva Maric.

1900 - 1904: Die ersten 5 wissenschaftlichen Veröffentlichungen.

1905 Einsteins *annus mirabilis*

- 17. März (vollendet u. eingereicht): Lichtquantenhypothese (Nobelpreis (NP)).
- 30. April Dissertation „Eine neue Bestimmung der Moleküldimensionen“.
- 11. Mai (eingegangen): Theorie der brownischen Molekularbewegung.
- 30. Juni (eingegangen): Schöpfung der speziellen Relativitätstheorie (SRT).
- 27. Sept. (eingegangen): Nachtrag zur SRT: $E = m \cdot c^2$.
- Ende 1905: 2 neue Anwendungen der Theorie der brownischen Molekularbewegung.

1905: Einsteins spezielle Relativitätstheorie (SRT)

Grundbegriffe aus der klassischen Physik

- Inertialsystem:

Wirkt auf einen Körper keine Kraft,
so ruht er oder er bewegt sich geradlinig mit konstanter Geschwindigkeit.

- Galileisches Relativitätsprinzip:

Die mechanischen Gesetze sind in allen Inertialsystemen gleich.

- Unterschied zwischen träger und schwerer Masse:

träge Masse m_t : $F = m_t \cdot a$, $m_t = \text{Kraft/Beschleunigung}$.

schwere Masse m_s : $F = m_s \cdot g$, mit $g = \text{Gravitationsfeldstärke}$, vgl. $F_{el.} = q \cdot E_{el.}$

Grundlagen der speziellen Relativitätstheorie:

1. Das galileische Relativitätsprinzip soll auch für elektromagnetische Vorgänge gelten.
2. In allen Inertialsystemen breitet sich das Licht im Vakuum isotrop und unabhängig von der Bewegung der Lichtquelle mit der Geschwindigkeit $c = 300\,000 \text{ km/s}$ aus.

Folgerungen:

- Es gibt keinen Licht-Äther, das Licht braucht zu seiner Fortpflanzung keinen Träger.
- Die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum c ist die physikalisch größtmögliche.
- Enge Verbindung von Raum und Zeit (4-dimensionale Raumzeit: ct, x, y, z).
- Enge Verbindung von träger Masse und Energie ($E = m_t \cdot c^2$).
- Bei sehr großen Geschwindigkeiten v treten neuartige Effekte in Erscheinung:
 - Für gegeneinander bewegte Beobachter sind zwei Ereignisse nicht gleichzeitig.
 - Relativistische Addition der Geschwindigkeiten: $v_{\text{gesamt}} = (v_1 + v_2) / (1 + v_1 v_2 / c^2)$.
 - Die Masse m_t eines Körpers wächst mit seiner Geschwindigkeit: $m_t = m_{t0} / \sqrt{1 - v^2/c^2}$.
 - Zeitdilatation: Bewegte Uhren gehen langsamer als ruhende: $\Delta t = \Delta t_R \cdot \sqrt{1 - v^2/c^2}$.
 - Längenkontraktion: $l_K = l_R \cdot \sqrt{1 - v^2/c^2}$ mit $l_R = \text{Eigenlänge im Ruhesystem d. Körpers}$.

Grundlegende Bedeutung der speziellen Relativitätstheorie:

- In der klassischen Physik

waren Raum und Zeit „leere Mietskasernen“,

in die die physikalischen Erfahrungen erst einziehen mussten (Hermann Weyl).

In der Relativitätstheorie

verliert die Zeit gegenüber dem Raum ihre Selbständigkeit.

„Die Physik [wurde] damit aus einem *Geschehen* im dreidimensionalen Raum gewissermaßen ein *Sein* in der vierdimensionalen Welt.“ (Otto Siebert 1921)

- Die SRT „versöhnte“ die maxwellsche Elektrodynamik mit der newtonschen Mechanik.
- Sie ist eine Rahmentheorie, die die ganze Physik betrifft.
- Einstein entriss damit der Philosophie das Thema Raum und Zeit.
- Das Standardmodell der Teilchenphysik
beruht auf der Vereinigung der SRT mit der Quantentheorie.

Einsteins Lebensweg nach 1905

- 1907 **Beginn seiner Arbeit an der allgemeinen Relativitätstheorie (ART).**
- 1908 Habilitation, Privatdozent an der Universität Bern.
- 1909 Professor an der Universität Zürich.
- 1911 Prof. an der deutschen Universität Prag. **Wiederaufnahme der ART-Arbeiten.**
- 1912 **Prof. an der ETH Zürich. Arbeit an der ART mit Marcel Grossmann.**
- 1914, **Berlin**, Preußische Akademie d. Wissenschaften. Juni: Trennung von Mileva.
Beginn seiner politischen Wirksamkeit.
- 1915, **November: Vortrag über die Vollendung der ART.**
- 1916, März: Zusammenfassung der ART (> 50 Seiten): Krönung seines Lebenswerkes.

Albert Einstein kurz nach Erschaffung der allgemeinen Relativitätstheorie

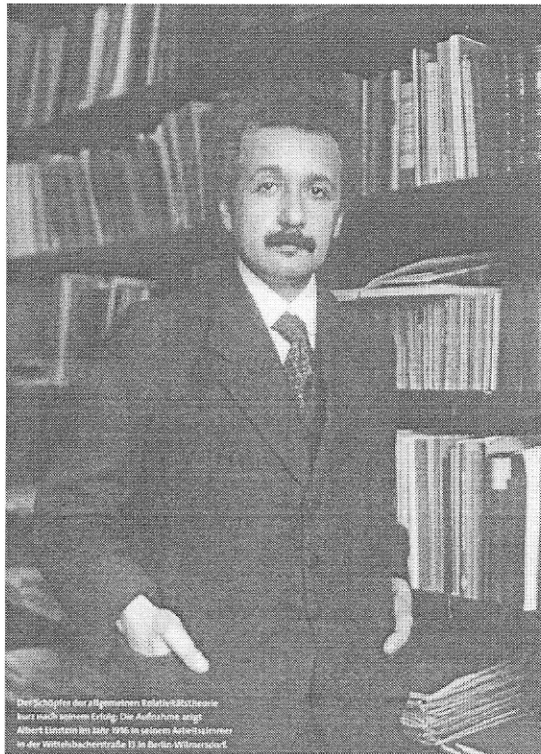


Foto aus *Spektrum der Wissenschaft*, Oktober 2015

- 1916 bis 1936 weitere wichtige Arbeiten über ART, Quantenmechanik u. a.
- 1919 Scheidung von Mileva und Heirat mit seiner Cousine Elsa.
- 1922 Beginn seiner Arbeiten zu einer verallgemeinerten Feldtheorie.
Nobelpreis (NP) für 1921.
- 1932, Dezember: Emigration in die USA.
- 1955, 11. April: Einstein-Russell-Manifest gegen das atomare Wettrüsten.
18. April: Tod durch Anriss eines Aneurismas.

Motivation und Zielstellungen Einsteins zur allgemeinen Relativitätstheorie

Ende Sept. 1907 Johannes Stark: Bitte um einen Bericht über die SRT.

Einstein liefert den Bericht in knapp 2 Monaten: 50 Seiten mit der Bemerkung, die Überlegungen zur SRT gelten nur für unbeschleunigte Bezugssysteme.

1.) Frage im letzten Kapitel: „*Ist es denkbar, dass das Prinzip der Relativität auch für Systeme gilt, welche relativ zueinander beschleunigt sind?*“

Also Idee einer **Verallgemeinerung auf beschleunigte / beliebige Bezugssysteme.**

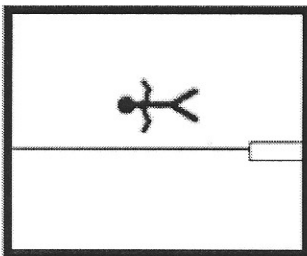
2.) Diskrepanzen zwischen SRT und Newtons Gravitationstheorie:

Der „*glücklichste Gedanke*“ seines Lebens (Ende Okt./Anfang Nov. 1907):

„*Ich saß auf meinem Stuhl im Patentamt in Bern. Plötzlich hatte ich einen Einfall: Wenn sich eine Person im freien Fall befindet, wird sie ihr eigenes Gewicht nicht spüren. Ich war verblüfft. Dieses einfache Gedankenexperiment machte auf mich einen tiefen Eindruck. Es führte mich zu einer Theorie der Gravitation.*“

Einstein hatte das Gefühl, „*daß eine vernünftige Gravitationstheorie nur von einer Erweiterung des Relativitätsprinzips zu erwarten war.*“

Wenig später: Weiterführung des Gedankenexperiments: Geschlossene Kabine.



a) Im freien Fall würde sich ein Mensch schwerelos fühlen.
Losgelassene Gegenstände schweben neben ihm.

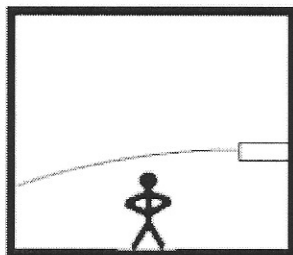
Gleiche Empfindung in gravitationsfreier Weltraumregion.

Kein Experiment ist denkbar zur Unterscheidung,

ob die Kabine mit zunehmender Geschwindigkeit in die Tiefe stürzt oder schwerelos umhertreibt.

Schwerelosigkeit heißt also auch, es wirkt nur die Schwerkraft!

b) Schwerelosigkeit, aber Kabine wird durch eine konstante Kraft aufwärts beschleunigt:



die Füße des Menschen infolgedessen auf den Boden gedrückt.
Fallende Gegenstände bewegen sich beschleunigt nach unten –
genau wie auf der Erde.

Auch hier: Keine Möglichkeit zur Unterscheidung
zwischen dem Einfluss der Schwerkraft
und dem Einfluss der beschleunigten Bewegung.

Die lokalen Auswirkungen sind also äquivalent: „**Äquivalenzprinzip**“.

Einstein: Deshalb müssen Schwerkraft und Beschleunigung

Ausprägungen desselben Phänomens sein: irgendeines kosmischen Feldes,

das sowohl für die Beschleunigung als auch für die Schwerkraft verantwortlich ist.

Bei der Suche nach dieser Theorie hatte Einstein weitere Zielstellungen:

zu 1) Besondere Beachtung rotierender Systeme (Spezialfälle beschleunigter Systeme).

3) Energie- und Impuls-Erhaltungssatz müssen immer gelten.

4) Newtonsche Gravitationstheorie und SRT müssen Grenzfälle der neuen Theorie sein.

5) Das Problem des Merkurperihels (s. u.) muss mit der neuen Theorie gelöst werden.

6) Ab 1911: Es muss sich die Ablenkung des Lichts ferner Sterne an der Sonne ergeben.

Vom rotierenden Bezugssystem zur allgemeinen Kovarianz

Einstein, „*Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie*“,
aus: *Annalen der Physik* **49** (1916), S. 774 f.¹

Vermessung eines Kreises
mit kleinen Stäbchen

in 2 Koordinatensystemen mit gleichem Ursprung im Kreismittelpunkt:

1. im ruhenden System K: $U/D = \pi$

2. im rotierenden System K': $U/D > \pi$,

denn es werden wegen der Lorentzkontraktion
mehr Stäbchen für den Umfang gebraucht.

D. h. im rotierenden System K' gilt nicht die euklidische Geometrie.

Ebensowenig kann man in K' eine den physikalischen Bedürfnissen entsprechende Zeit einführen, welche durch relativ zu K' ruhende, gleich beschaffene Uhren angezeigt wird. ... Wegen der Zeitdilatation würde ein im Ursprung befindlicher Beobachter ... die an der Peripherie angeordnete Uhr langsamer gehen sehen als die neben ihm angeordnete Uhr... Er wird also nicht umhin können, die Zeit so zu definieren, daß die Ganggeschwindigkeit einer Uhr vom Orte abhängt.

Wir gelangen also zu dem Ergebnis: In der allgemeinen Relativitätstheorie können Raum- und Zeitgrößen nicht so definiert werden, daß räumliche Koordinatendifferenzen unmittelbar mit dem Einheitsmaßstab, zeitliche mit einer Normaluhr gemessen werden könnten.

Das bisherige Mittel, in das zeiträumliche Kontinuum in bestimmter Weise Koordinaten zu legen, versagt also, und es scheint sich auch kein anderer Weg darzubieten, der gestatten würde, der vierdimensionalen Welt Koordinatensysteme so anzupassen, daß bei ihrer Verwendung eine besonders einfache Formulierung der Naturgesetze zu erwarten wäre. Es bleibt daher nichts anderes übrig, als alle denkbaren Koordinatensysteme als für die Naturbeschreibung prinzipiell gleichberechtigt anzusehen [Kovarianz]. Dies kommt auf die Forderung hinaus:

*Die allgemeinen Naturgesetze sind durch Gleichungen auszudrücken,
die für alle Koordinatensysteme gelten.*

¹ Einstein wörtlich in Kursiv.

Die Ergebnisse (Vortrag am 25. 11. 1915, Publikation erschien am 20. 3 1916)

Alle 6 genannten Zielstellungen wurden erreicht,

die richtigen Werte f. Merkurperihel und Lichtablenkung an der Sonne erst 18. 11. 1915.

Äquivalenzprinzip i. e. S. (schwaches Äquivalenzprinzip): träge Masse = schwere Masse

Schon 1553 Giovanni Battista Benedetti; dies war bis zu Einstein unverstanden!

Einstein hat das zu erklärende Faktum zum Prinzip erhoben.

Grundgleichungen der ART $R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R (+ \Lambda g_{\mu\nu}) = \kappa T_{\mu\nu}$

Gleichungssystem aus 10 nichtlinearen gekoppelten Differenzialgleichungen 2. Ordnung für die 10 unabhängigen Gravitationspotenziale des metrischen Tensors g_{mn} .

Die Lösungen sind von Problem zu Problem ganz verschieden (Randbedingungen, Integrationskonstanten), mathematisch höchst anspruchsvoll, meist existieren gar keine exakten Lösungen, nur Näherungslösungen; noch heute werden neue Lösungen gesucht.

Dieses Gleichungssystem ist die **Essenz der ART:**

- **Massen krümmen den Raum.**
- **In der Nähe großer Massen verlangsamt sich auch die Zeit.**
- **Dadurch sind Raumkrümmung und Zeitdehnung miteinander verwoben.**
- **Deshalb müssen alle physikalischen Abläufe in einer vierdimensionalen gekrümmten Raumzeit betrachtet werden.**
- **Die Materie ‚sagt‘ der Raumzeit-Geometrie, wie sie sich krümmen muss, die Raumzeit-Geometrie ‚sagt‘ Materie u. Licht, wie sie sich bewegen müssen.**
- **Die Gravitation beruht auf der Krümmung der Raumzeit.**
Die von den 4 Fundamental-Kräften zuerst erforschte ist nun keine „Kraft“ mehr!
- **Der Raum ist damit nicht länger eine Art Behälter für die Massen, sondern ein Gegenstand der Physik mit innerer Dynamik.**

Einstein über seine allgemeine Relativitätstheorie:

- Sie sei „von unvergleichlicher Schönheit“, der „wertvollste Fund, den ich in meinem Leben gemacht habe“, bei dem „die kühnsten Träume ... in Erfüllung gegangen“ sind.
- Essenz in einem einzigen Satz (auf Bitten von Reportern nach einigem Nachdenken):
„Früher hatte man geglaubt, wenn alle Dinge aus der Welt verschwinden, so bleiben noch Raum und Zeit übrig;
nach der Relativitätstheorie verschwinden aber Zeit und Raum mit den Dingen.“

Felix Klein: Verquickung philosoph. Bedürfnisse mit einem starken physikal. Instinkt.

Ernst Schmutzer nennt diesbezügliche Charaktereigenschaften Einsteins:

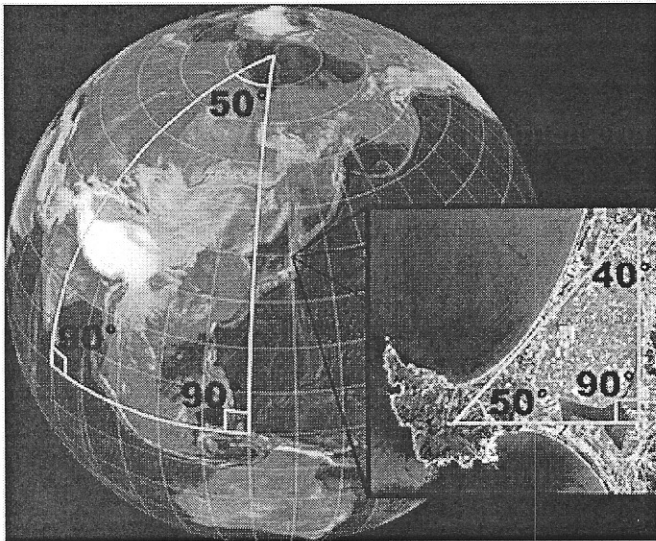
„Tiefgründige Grüblernatur, zähe Geduld und beachtlicher Fleiß, unbeirrbar Überzeugung vom Sinn der sich selbst gestellten Aufgabe, einfache Denkart, ein philosophischer Blick für das Ganze in seiner Einheit, ausreichende mathematische Begabung und schließlich genug inneren Frieden und Humor, um mit den Störfaktoren seiner Umgebung fertig zu werden.“

Bemerkung zur Verallgemeinerung des Relativitätsprinzips der SRT

Ruhenden oder gleichförmig bewegten, kräftefreien Inertialsystemen, wie Einstein sie in der SRT verwendete, treten beschleunigte Testlabore (Bezugssysteme) gleichberechtigt an die Seite. Sie lassen sich als ruhend auffassen, wenn man annimmt, dass in ihnen ein Gravitationsfeld bestimmter Art wirksam ist.²

Bemerkungen zur unanschaulichen Raumzeitkrümmung

Die vierdimensionale Raumzeit der SRT ist bereits anschaulich nicht vorstellbar. Für eine zusätzlich gekrümmte Raumzeit in der ART gilt das erst recht. Möglich ist aber gewisse Veranschaulichung mit reduzierter Anzahl von Dimensionen:



Sphärisches Dreieck:

Winkelsumme eines Dreiecks auf einer Kugel i. Allg. $> 180^\circ$. Die Oberfläche einer Kugel ist gekrümmt, d. h. nicht euklidisch, aber lokal sind die Gesetze der euklidischen Geometrie eine gute Näherung. Z. B. ist in einem kleinen Dreieck auf der Erdoberfläche die Winkelsumme ziemlich genau 180° .

Gedankenexperiment (in umgekehrter Richtung:)

Betrachtung zweier Fahrzeuge nebeneinander am Äquator parallel in Richtung Norden: Sie würden sich am Nordpol treffen. Ein Beobachter, dem die Kugelgestalt der Erde verborgen bliebe, würde daraus auf eine Anziehungskraft zwischen den beiden Fahrzeugen schließen. Es handelt sich aber um ein rein geometrisches Phänomen.

Lew Landau (1908 - 1968) war tief von der „unwahrscheinlichen Schönheit“ der ART fasziniert; bei der ersten Begegnung mit ihr sollte ein derartiges Entzücken für den echten theoretischen Physiker symptomatisch sein.³

„Dass der Mensch Dinge versteht,
die er sich nicht mehr vorstellen kann,
ist der höchste Triumph des menschlichen Genius.“

² Janssen und Renn, Spektrum der Wissenschaft, Okt. 2015, S. 49.

³ Anna Liwanowa, Lew Landau, Leipzig: Teubner 1982, S. 138.

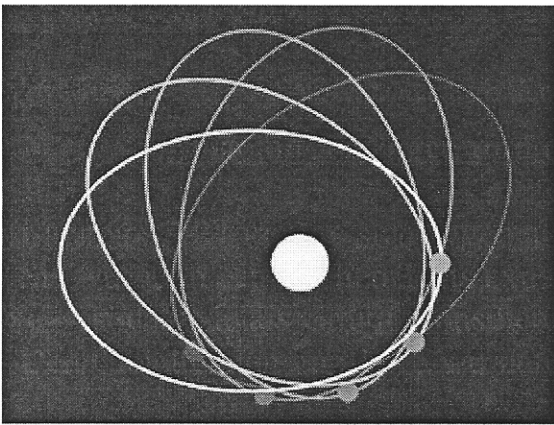
Einzelne Aussagen und deren Bestätigungen von 1909 bis 2016

- Einsteins ART konnte sich gegen alle später vorgeschlagenen Alternativen durchsetzen.
- Sie wurde in zahlreichen Tests experimentell bestätigt, sodass sie als Gravitationstheorie allgemein anerkannt ist.
- Den Gleichungen von 1915 wurden im Lauf der Zeit weitere Folgerungen entnommen.

1) Die Bestätigungen des Äquivalenzprinzips

1909 Loránd Eötvös (Ungar): Pb und Al mit d. Torsionswaage gemessen: genau auf 10^{-9} .
1999 Eric Adelberger (USA): Torsionswaage, Genauigkeit 10^{-13} , gegenwärtiger Rekord.
Bestätigt ist die notwendige zeitliche Konstanz der newtonschen Gravitationskonstante.

2) Die Drehung des Merkurperihels



- Mehrere Effekte bewirken, dass das Perihel der Planeten um die Sonne rotiert.
- 1859 Urbain Le Verrier: Die Periheldrehung des Merkur ($572''/\text{Jahrhundert}$) weicht von den Berechnungen nach der newtonschen Theorie um (neuerer Wert) $43''/\text{Jahrhundert}$ ab.

Einsteins ART erklärt dies (Genauigkeit 1 %).
Es liegt an der zusätzlichen Raumkrümmung.
Erste Bestätigung der ART!

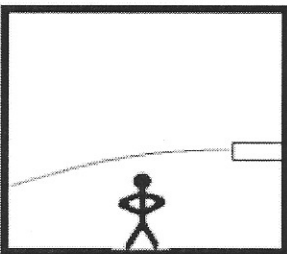
Einstein: „*Ich war einige Tage fassungslos vor freudiger Erregung.*“

- Periheldrehungen der anderen Planeten sind kleiner. Erde aufgrund der ART ca. $5''/\text{Jh.}$
- Perihelverschiebung von PSR 1913+16 ca. $4,2^\circ$ pro Jahr gemessen = berechnet $\hat{=}$ ART.

3) Die Lichtablenkung an der Sonne

- Henry Cavendish (1784), Johann Georg von Soldner (1801) mit Newtons Theorie:
Licht als massebehaftetes Teilchen aufgefasst => Ablenkung von Sternenlicht!

- Einstein: Voraussage 1907: 2. obiges Bild: Schwerelosigkeit, Beschleunigung n. oben:



Allein aus dem Äquivalenzprinzip: =>

Lichtkrümmung mit gleichem Wert wie Soldner.

Zusätzliche Berücksichtigung der Raumkrümmung: 2mal so groß!

- 1919 totale Sonnenfinsternis: Expeditionen Eddington und Dyson:
Beobachtung des Lichts der Hyaden auf Principe bzw. in Brasilien:
Bestätigung der ART: Einstein wurde über Nacht weltberühmt.

- Einstein auf die Frage, wenn die ART nicht bestätigt worden wäre:

„*Das hätte mir leid getan für den lieben Gott, die Theorie ist korrekt.*“

- 1990er Jahre: Jahrelange Präzisionsbestimmungen mit Radioteleskopen:
Bestätigung der ART-Werte für die Lichtablenkungen auf wenige Promille genau.

4) Die Gravitations-Rotverschiebung

Rotverschiebung $z = \Delta\lambda/\lambda_0 = -\Delta v/v_0 =$ Frequenzerniedrigung.

Von Einstein bereits 1907 vorhergesagt:

Er betrachtete zwei Körper in verschiedener Höhe h in einem Schwerfeld.

Der obere emittiert el.-magn. Energie E in Richtung zum unteren, der sie absorbiert.

Er fand: Die absorbierte Energie ist höher als die emittierte: $\Delta E = (E/c^2)gh$.

Wegen $E \sim hv$ also Blauverschiebung beim Fallen, Rotverschiebung beim Aufsteigen.

Richtige Vorhersage Einsteins: Licht von der Sonne zur Erde: $z = 2 \cdot 10^{-6}$.

Dies war der dritte 1916 von Einstein vorgeschlagene („klassische“) ART-Test.

Eigentlich kein Test der ART, sondern insbes. des Äquivalenzprinzips.

Trotzdem ist der Nachweis des Effekts eine bedeutende Stütze der ART.

Anregung von Erwin Freundlich und Einstein vor allem für den Bau des architek. wertvollen „Einsteinturms“ (Potsdam 1922) durch Erich Mendelsohn.

Der Test war wegen Turbulenzen in der Sonnenatmosphäre nicht möglich.

1960 erster Pound-Rebka-Versuch: erster ART-Test mit Präzisionsmesstechnik.

USA, im Schwerfeld der Erde: Turm, Höhendifferenz 22,5 m => ART: $\Delta v/v_0 \approx 10^{-15}$.

Anwendung des 1959 entdeckten Mößbauer-Effekts.

(NP 1961 „auch für neue Experimente zur Rotverschiebung im Schwerfeld“).

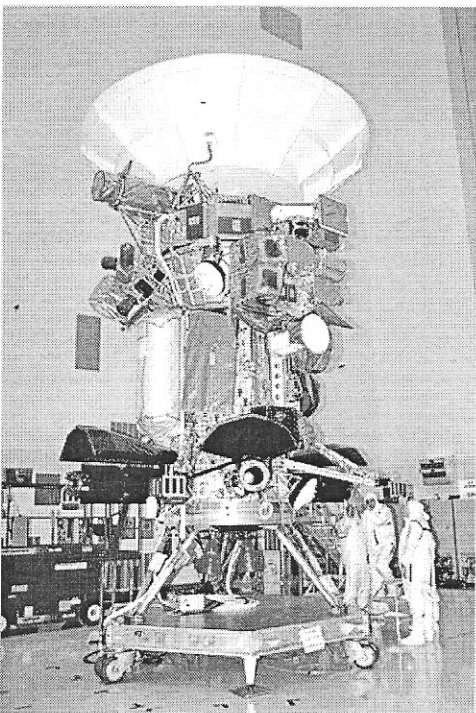
Hubmechanik: Probe am Turmfuß musste gleichmäßig mit $v \approx 1$ mm/h bewegt werden!

1965 Wiederholung: Bestätigung der ART bis auf 1%.

1976 Vessot et al.: Vergleich von 2 H-Maser-Uhren in 10 000 km bzw. Erdoberfläche.

Damit war die gravitative Rotverschiebung bis auf 0,07 Promille genau gemessen.

2002 Luciano Iess: ESA-Raumsonde Cassini-Huygens



zum Studium des Saturns und seiner Monde.

Ursprünglich waren keine ART-Tests vorgesehen.

1997 Start der Sonde,

2002 Flug-Gebiet zwischen Jupiter und Saturn,

dabei Konjunktion mit der Sonne:

Vorschlag von Bruno Bertotti: ART-Messungen:

2002 sandte Cassini Funksignale zur Erde,

knapp an der Sonne vorbei:

Es wirkten mehrere relativistische Effekte.

Die empfangene Frequenz

war minimal geringer als gesendet:

Bestätigung der ART auf 0,02 Promille:

Besserer Test als alle vorigen.

(2005 Landung der Sonde Huygens auf Mond Titan,

2017 geplantes Ende der gesamten Mission:

Eintauchen von Cassini in die Saturn-Atmosphäre).

5) Die Shapiro-Verzögerung (Zeitverzögerung im Schwerfeld)

Die ART besagt: In der Nähe großer Massen verlangsamt sich die Zeit. D. h. es wird Licht i. e. Schwerfeld nicht nur abgelenkt und rotverschoben, sondern auch verlangsamt.

Beispiel: Burj Khalifa, Dubai (2004 - 2010, Höhe 828 m, 189 Stockwerke):

Die untere Uhr geht in 1 Mio. Jahren um 2,81 Sekunden nach.

1964 Vorschlag von Irwin Shapiro, „Vierter Test der allgemeinen Relativität“:

Man misst die Zeitverzögerung von Radarechos im Schwerfeld der Sonne.

ab 1968 erste erfolgreiche Messungen von Shapiro

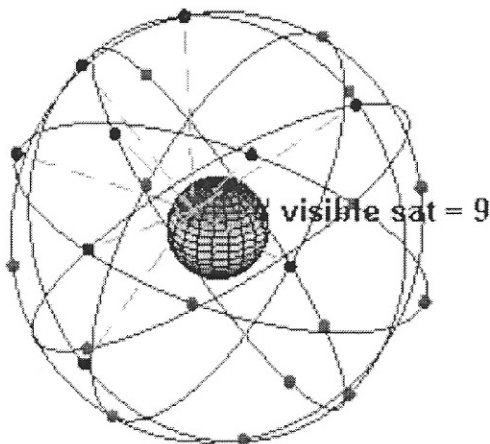
mittels reflektierter Radarsignale von Venus bzw. Merkur, während sie sich von der Erde aus fast hinter der Sonne befanden: Radarwellen mussten nahe am Sonnenrand passieren (hin und zurück). Zusätzlicher - viel stärkerer - Effekt als durch die Lichtkrümmung.

Bisher genaueste Messung: 2002 bei der Konjunktion von Cassini mit der Sonne.

Genauigkeit von 0,001 %.

Bemerkung zum Global Positioning System GPS

24 Satelliten umkreisen die Erde in einer mittleren Bahnhöhe von 20 200 km.



Es müssen relativistische Effekte

berücksichtigt werden wegen

- Höhenunterschied zwischen Erde und Satelliten,
- Geschwindigkeiten der Satelliten (Atom-Uhren),
- Lichtlaufzeiten.

Bei Flughöhen unterhalb ca. 3 000 km überwiegt die speziell-relativistische Zeitdilatation.

Bei Flughöhen über ca. 3 000 km überwiegt der gravitative ART-Effekt,

in der GPS-Satellitenbahn um mehr als das 6-fache.

Auf den Satelliten geht damit die Zeit vor.

Beim Start des ersten Satelliten 1978 wurde die gravitative Zeitdilatation ignoriert.

Die Uhren zeigten die erwartete Verschiebung gemäß Relativitätstheorie von $38 \mu\text{s} / \text{Tag}$ (ausreichend, um die GPS-Funktionen substanziell in wenigen Stunden zu behindern).

Damit die Satellitensignale außer zur Positionsbestimmung auch als Zeitstandard verwendbar sind, wird der relativistische Gangunterschied der Uhren kompensiert. Dazu wird die Schwingungsfrequenz der Satelliten-Uhren auf $10,229999995453 \text{ MHz}$ verstimmt, so dass trotz der relativistischen Effekte ein synchroner Gang mit einer irdischen Uhr von genau $10,23 \text{ MHz}$ gewährleistet ist.

„Hafele-Keating-Experimente“ ab 1971

Atomuhren in verschiedenen Höhen. Beide Effekte werden zugleich nachgewiesen.

Relativistische Geodäsie

Mit heutigen Atomuhren kann man Höhenunterschiede auf der Erde von cm messen.

6) Die Expansion des Universums

- 1916/17: Einstein

Erstmalige Anwendung der ART auf das Universum als Ganzes:

Voreingenommenheit: Einstein wollte ein in sich ruhendes, statisches Universum. Die Gleichungen ergaben aber Expansion oder Kontraktion, deshalb modifizierte Einstein seine Gleichungen mittels des sog. kosmologischen Gliedes $\Lambda_{g_{\mu\nu}}$.

- 1922: Alexander Friedmann (1888 - 1925):

Das Universum kann nach der ART nur entweder expandieren oder kontrahieren.

Einstein erst ablehnend, dann zustimmend; anderen bis 1929 kaum bekannt.

- 1912 - 1924: Vesto Slipher

Radialgeschwindigkeiten von Spiralnebeln (aus der Verschiebung der Spektrallinien):

4 blauverschobene (Bewegung zu uns), 37 rotverschobene (von uns weg).

- 1925: Edwin Powell Hubble

bestätigte frühere Vermutungen: Spiralnebel sind eigenständige weit entfernte Galaxien.

Z. B. Andromeda-„Nebel“: weit außerhalb der Milchstraße: 2,5 Mio. Lj (Lichtjahre).

- 1927 und 1931 Georges Lemaître

folgerte aus der ART: Geschwindigkeit ferner Galaxien ist proportional der Entfernung, verglich das mit den Messungen von Slipher und Hubble; betonte, dass die großen Rotverschiebungen nicht als Galaxienflucht gedeutet werden dürfen, sondern sie zeigen „wie Mikroben auf einer Seifenblase“ die Expansion des Universums an. Rückverfolgung: „Atome primitive“, „Ur-Ei“: Lemaitre entdeckte den Urknall!

- Diese Expansion wurde als direkte Bestätigung der ART angesehen,

auch 1931 von Einstein: Er bezeichnete (George Gamow zufolge)

seine Einführung des kosmolog. Gliedes als „*die größte Eselei meines Lebens*“.

- 1933 Erich Regener und 1948 George Gamow, Ralph Alpher und Robert Herman:

Voraussage der kosmischen Hintergrundstrahlung als Folge des Urknalls (wenige K).

- 1964 Arno Penzias und Robert W. Wilson entdeckten sie: Beweis für den Urknall!

Genaue Vermessung u. a. durch eigens dafür konstruierte 3 Satelliten 1992 - 2012.

- 1981 Alan H. Guth: Hypothese der frühen inflationären Expansion

(10^{-35} s bis ca. 10^{-33} s nach dem Urknall).

- Ende der 1990er Jahre: Saul Perlmutter, Brian P. Schmidt und Adam Riess:

Die jetzige Expansion des Universums verläuft beschleunigt!

- Inflation und beschleunigte Expansion sind Bestandteile des heutigen Urknall-Modells, sie benötigen das kosmologische Glied! (Favorisierung des Λ CDM-Modells).

[Eva Raisig, DLF:]

- Die Rotverschiebung der Galaxien ist eine an den Nachthimmel geworfene Bestätigung von Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie.

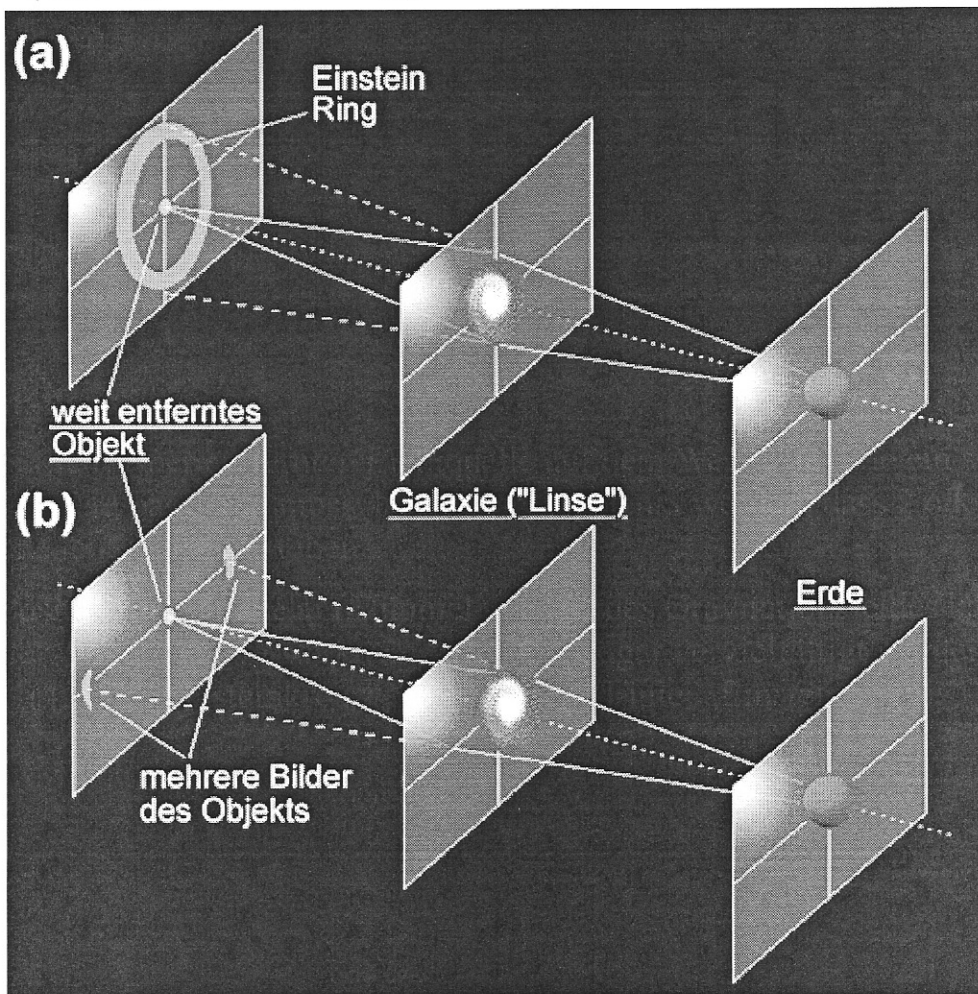
- Für Einstein waren Lemaîtres Ur-Ei und Hubbles Beobachtungen

die schönste und befriedigendste Erklärung der Schöpfung, die er je gehört hatte.

7) Gravitationslinsen

Wenn das Licht einer entfernten Lichtquelle auf dem Wege zur Erde ein starkes Gravitationsfeld passieren muss, kann es so abgelenkt werden, dass 2 oder mehrere Bilder der Lichtquelle entstehen.

Je nach Position der Quelle am Himmel und Art des Gravitationsfeldes kann das Bild der Quelle verschoben, verstärkt, verzerrt oder sogar vervielfältigt werden (4fach: „Einstein Kreuz“, geschlossene Linie: „Einsteinring“).



Einstein war der Effekt bereits 1912 bekannt, doch erst 1936 publiziert (theoretisch beschrieben), hat aber nicht an die reale Existenz von Gravitationslinsen geglaubt.

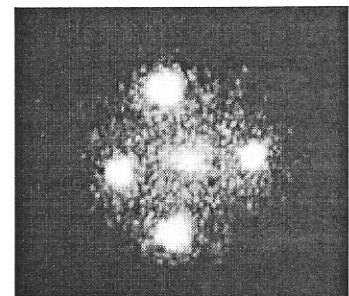
Als Gravitationslinsen können wirken:

massereiche Sterne, Galaxien (1937 Fritz Zwicky), Galaxienhaufen, dunkle Materie.

Erste Beobachtung 1979: „Twin Quasar“ Q 0957+561 (Abb. b): Abstand der Bilder 7", auffällig war ihre gleiche chemischen Zusammensetzung; „Linse“ war Galaxienhaufen.

1985 Einstein Kreuz des Quasars QSO 2237+0305 im Pegasus: ca. 8 Mrd. Lj von der Erde entfernt, von der Erde aus gesehen genau hinter dem Kern einer etwa 400 Mio. Lj entfernten Galaxie (rechts in Bildmitte), die als Gravitationslinse wirkt. Abstand der gegenüberliegenden Bilder des Quasars 1,6".

Gegenwärtig sind mehr als 100 Gravitationslinsen bekannt.



8) Der Lense-Thirring-Effekt,

1918 von den Österreichern Josef Lense und Hans Thirring aus der ART vorausgesagt.

Gyroskope (rasch rotierende symmetrische Kreisel) an Bord von Satelliten unterliegen 2 ART-Effekten:

- a) Krümmung der Raumzeit durch die Erde: „geodätischer Effekt“,
- b) Lense-Thirring-Effekt:

Die Raumzeit verhält sich wie zähflüssiger Sirup
und wird von der rotierenden Erde teilweise mitgeschleift.
100mal kleiner als der geodätische Effekt!

Voraussage: Die Rotationsachse kippt pro Jahr um 0,039 ".

(1 Millibogensekunde: Breite eines menschlichen Haares aus 16 km Entfernung.)

Nachweis: „Gravity Probe B“ (eigens dafür konstruierter NASA-Satellit).

1960 Konzeption, 2004 Start, einjährige Messphase, 5jährige „heldenhafte“ Auswertung. Höchste technische Anforderungen! Messergebnis 0,037 " (sehr gute Übereinstimmung).

Bedeutung:

Verantwortlich für die enorme Leuchtkraft von Quasaren.

(Der Effekt ermöglicht dem Plasma der Akkretionsscheibe, das in das meist rotierende schwarze Loch im Zentrum des Quasars fällt, eine stabile Umlaufbahn knapp außerhalb des Schwarzschildradius (s. u.) Dadurch kann das Plasma heißer werden als bei einem nicht rotierenden schwarzen Loch und folglich stärker strahlen.)

9) Schwarze Löcher

- 18. Jh. John Michell: Besäße die Sonne nur eine genügend große Masse, wäre nicht einmal Licht imstande, der Sonnenoberfläche zu entkommen.
- Anfang 1916 von Karl Schwarzschild aus den Gleichungen der ART gefolgert.
- 1939 von Robert Oppenheimer et al. theoretisch untersucht:
„Wenn die gesamten thermonuklearen Energiequellen erschöpft sind, kollabiert ein hinreichend schwerer Stern; die ... Kontraktion hat keine Grenze.“
- Einstein ablehnend, er ersann zur Widerlegung ein fehlerhaftes Gedankenexperiment.
- Ab Anfang der 1960er Jahre: erneute Forschungen.
- 1967: John A. Wheeler etablierte (nicht erfand) den Begriff „schwarzes Loch“.
- 1974 Stephen Hawking: Schwarze Löcher können zerstrahlen.

- Gegenwärtig ist man sich sicher:

Schwarze Löcher gibt es - als Endstadien der Entwicklung sehr massereicher Sterne,
- sowie in den Zentren von Galaxien.

Im Zentrum unserer Galaxis existiert ein schwarzes Loch mit 4,3 Mio. Sonnenmassen, genannt Sagittarius A*.

10) Gravitationswellen

1918 von Einstein aus den Feldgleichungen abgeleitet:

Ähnlich, wie sich elektromagnetische Wellen vom Entstehungsort ablösen, können sich auch Gravitationsfelder mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten.

Entstehung, wenn große Massen ihre Dichte oder ihren Ort sehr schnell ändern, z. B. Supernova-Explosionen, verschmelzende Neutronensterne, sehr rasch rotierende Doppelsternsysteme, (direkter Nachweis, s. u.!) kollidierende schwarze Löcher (s. u.).

[Umlauf der Erde um die Sonne (29,8 km/s): 200 Watt, d. h. unmessbar klein.]

Indirekte Nachweise: Rotierende Doppelsternsysteme.

Die Umlaufbahnen der beiden sich umkreisenden Massen werden im Laufe der Zeit immer enger, das System verliert somit Energie. Die beobachteten Energieverluste entsprachen dabei den theoretisch erwarteten Abstrahlungen durch Gravitationswellen.

Beispiel a):

System PSR 1913+16, von Taylor und Hulse 1974 entdeckt u. bis 1979 erforscht: Ein Pulsar umkreist einen anderen Neutronenstern, Rotationsperiode ca. 17 U/s. Annäherung auf einer Spiralbahn: 3,5 m/Jahr, Verschmelzung in 300 Mio. Jahren. Diese Verkürzung stimmt mit der ART-Vorhersage bis auf weniger als 1 % überein, hat viele Forscher von der Existenz der Gravitationswellen überzeugt. (NP 1993).

Beispiel b):

Doppelpulsar J0737-3039, entdeckt 2003 von Marta Burgay et al., Bologna, ähnlich überzeugend wie eben beschriebener Doppel-Neutronenstern.

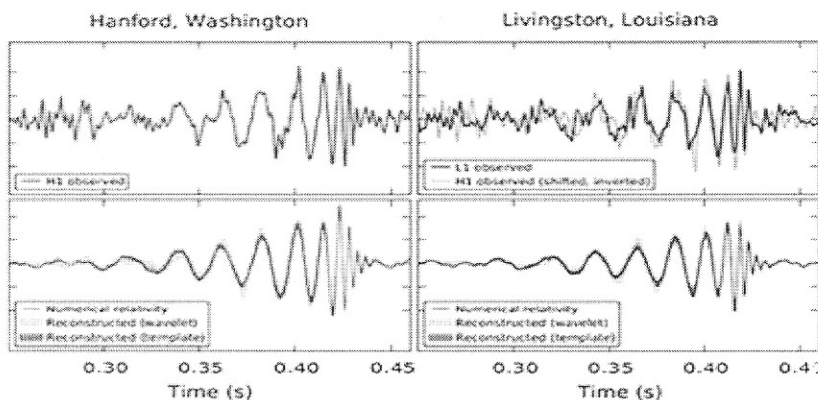
Direkter Nachweis 14. Sept. 2015, veröffentlicht am 11. Feb. 2016, > 1000 Autoren. vom Laser Interferometer Gravitation Wave Observatory (LIGO), bestehend aus 2 Observatorien in Livingston (Louisiana) und Hanford (Washington st.). Jedes besitzt ein L-förmiges Ultrahochvakuumsystem mit je 4 km Schenkellänge, in dem ein Laser-Interferometer untergebracht ist.

Beim Durchqueren einer Gravitationswelle ändern sich die Armlängen.

Unterschiede von ca. 10^{-3} Protonen-Durchmesser messbar. (Protonen- $\varnothing = 1,7$ fm.)

Beide LIGO-Detektoren hatten das Gravitationswellensignal registriert.

Ursache: Verschmelzung zweier schwarzer Löcher (29 bzw. 36 M_{\odot}) vor 1,3 Mrd. Jahren zu einem einzigen von ca. 62 M_{\odot} . Demnach ist in einem Sekundenbruchteil die Energie von ca. drei Sonnenmassen M_{\odot} in Form von Gravitationswellen frei geworden.



Stärkstes je im Universum beobachtetes Ereignis!
Die Ergebnisse belegen sowohl die Existenz von Gravitationswellen als auch die Existenz schwarzer Löcher.
100 Jahre nach der Geburt der ART beginnt nun eine neue Ära der Astronomie.

Abschließende Bemerkungen

Zur Bedeutung der ART

- Sie ist die Erweiterung sowohl der Newtonschen Gravitationstheorie als auch der SRT und enthält beide als spezielle Grenzfälle (z. Zt. beste Beschreibung der Gravitation).
- Im Gegensatz zu den 3 anderen fundamentalen Wechselwirkungen wird die Gravitation nicht mehr als Kraft verstanden, sondern als physikalischer Aspekt einer Raumkrümmung.
- Den Abstandsbegriff in Raum und Zeit von einem physikalischen Phänomen wie der Schwerkraft abhängig zu machen, bedeutete eine geistige Revolution.⁴
- Die ART klärte mehrere damals ungelöste physikalische Probleme.
- Sie führte zu mittlerweile glänzend bestätigten Voraussagen.
- Sie bildete die Grundlage der Urknall-Theorie.
- Sie wurde praktisch unverzichtbar beim Navigationssystem GPS.
- „In ihrer unvermuteten Anwendbarkeit“
auf derartige und weitere astrophysikalische Probleme „liegt ein besonderer Zauber der Theorie“.⁵ Sie fügt sich ein in eine Grundtendenz der Physik insbes. des 20. Jh.: der zunehmenden Mathematisierung und Abstraktion (Verlust der Anschaulichkeit). Doch gerade dadurch wurden - „man möchte fast ergänzen: ironischerweise“⁶ - enorme Fortschritte bzgl. der konkreten Anforderungen bei Experimenten und Vorhersagen erzielt.

Ausblick

- Die ART ist mit der Quantenmechanik eine der beiden Säulen der theoret. Physik. Man hofft, dass deren Vereinigung zu einer Theory of Everything möglich ist, die zu den großen Herausforderungen der physikal. Grundlagenforschung zählt.
- Robert B. Laughlin (Nobelpreis 1998) erachtet die Schwerkraft sowie Raum und Zeit als nicht fundamental, sondern als emergent:

„Einstein war Künstler und Gelehrter, aber vor allem war er Revolutionär... Die unbegründete Überzeugung seiner Zeit war der Äther, genauer gesagt, die der Relativität vorangehende, naive Version des Äthers. Die unbegründete Überzeugung unserer Zeit ist die Relativität selbst. Es würde vollkommen Einsteins Naturrell entsprechen, sich die Fakten erneut vorzunehmen, sie im Geiste umzuwerfen und zu dem Schluss zu kommen, dass sein geliebtes Relativitätsprinzip keineswegs fundamental, sondern emergent ist.“⁷

⁴ Hubert Goenner, Einsteins Relativitätstheorien, München: Beck 2002, S. 63.

⁵ Janssen und Renn, l. c., S. 55.

⁶ Sieroka, Philosophie der Physik, S. 115.

⁷ Laughlin, Abschied von der Weltformel, Piper, 2007, S. 190.