Relativitätstheorie einfach erklärt: Was Einstein über Raum und Zeit herausfand

SPEZIELLE UND ALLGEMEINE RELATIVITÄTSTHEORIE

Ihr Kopf altert schneller als Ihre Füße. Nicht viel: Wer achtzig Jahre lang ununterbrochen stünde, dessen Kopf wäre am Ende um knapp eine halbe Mikrosekunde älter als die Zehen (eigene Rechnung für 1,7 Meter Höhenunterschied). Spüren wird das niemand. Messen lässt es sich trotzdem, nicht an Menschen, aber an Atomuhren, inzwischen sogar innerhalb einer Wolke aus Atomen, die nur einen Millimeter hoch ist [1]. Dass die Zeit nicht überall gleich schnell vergeht, gehört zu den Vorhersagen, mit denen Albert Einstein 1905 und 1915 das Bild von Raum und Zeit umgebaut hat [2],[3].

Hinter dem Namen stecken zwei Theorien. Die **spezielle Relativitätstheorie** von 1905 beschreibt, wie Längen, Zeiten und Energie aussehen, wenn sich etwas sehr schnell bewegt. Die **allgemeine Relativitätstheorie** von 1915 nimmt die Schwerkraft dazu: Masse und Energie krümmen Raum und Zeit, und diese Krümmung spüren wir als Gravitation. Beide Theorien haben jede Prüfung bestanden, die man sich bisher ausgedacht hat. Und doch passt die allgemeine bis heute nicht mit der Quantenphysik zusammen.

Ein Versuch, der nichts fand

Im 19. Jahrhundert stellte man sich Licht als Welle in einem unsichtbaren Stoff vor, dem Äther. Wenn die Erde auf ihrer Bahn um die Sonne durch diesen Äther fliegt, müsste Licht je nach Richtung etwas schneller oder langsamer ankommen, so wie man auf dem Fahrrad Gegenwind spürt. Albert Michelson und Edward Morley bauten 1887 ein Messgerät, das solche Unterschiede hätte zeigen müssen. Sie fanden keine [4].

Einstein ging 1905 einen anderen Weg. Seine Arbeit „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“ beginnt nicht mit dem Äther, sondern mit einer Ungereimtheit beim Zusammenspiel von Magnet und Leiter, und stellt dann zwei Grundsätze an den Anfang [2]. Erstens: Die Naturgesetze sehen für jeden gleichförmig bewegten Beobachter gleich aus, niemand ist in absoluter Ruhe. Zweitens: Licht breitet sich im leeren Raum immer mit derselben Geschwindigkeit aus, egal wie schnell sich die Lichtquelle bewegt. Diese Geschwindigkeit ist heute so genau bekannt, dass sie nicht mehr gemessen wird, sondern festgelegt ist: c = 299 792 458 Meter pro Sekunde, und daraus ist der Meter definiert [5].

Klingt harmlos, ist es aber nicht. Wenn zwei Beobachter, die aneinander vorbeifliegen, für dasselbe Lichtsignal dieselbe Geschwindigkeit messen, dann können ihre Uhren und Maßstäbe nicht mehr übereinstimmen. Etwas muss nachgeben, und bei Einstein geben Raum und Zeit nach.

Bewegte Uhren gehen langsamer

Das einfachste Gedankenexperiment dazu ist eine Lichtuhr: zwei Spiegel übereinander, dazwischen läuft ein Lichtpuls auf und ab, jeder Durchgang ist ein Tick. Fährt die Uhr an Ihnen vorbei, sehen Sie den Lichtpuls auf einer schrägen Zickzackbahn laufen, also einen längeren Weg. Weil Licht für Sie aber nicht schneller ist als für jemanden, der mitfährt, braucht jeder Tick länger. Die bewegte Uhr geht aus Ihrer Sicht langsamer. Mit dem Satz des Pythagoras folgt daraus der Lorentz-Faktor γ, der angibt, um wie viel:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \qquad \Delta t = \gamma \cdot \Delta t_0 \tag{1}$$

Dabei ist v die Geschwindigkeit, Δt_0 die Zeit, die die bewegte Uhr selbst anzeigt, und Δt die Zeit, die Sie mit Ihrer ruhenden Uhr messen. Bei Alltagsgeschwindigkeiten ist γ so nahe an 1, dass man nichts bemerkt. Ein ICE mit 300 km/h verliert pro Stunde Fahrt gegenüber dem Bahnsteig etwa 0,14 Nanosekunden (eigene Rechnung). Erst nahe an der Lichtgeschwindigkeit wird der Effekt groß (Abb. 1). Längen in Bewegungsrichtung schrumpfen übrigens um denselben Faktor, man spricht von Längenkontraktion [2].

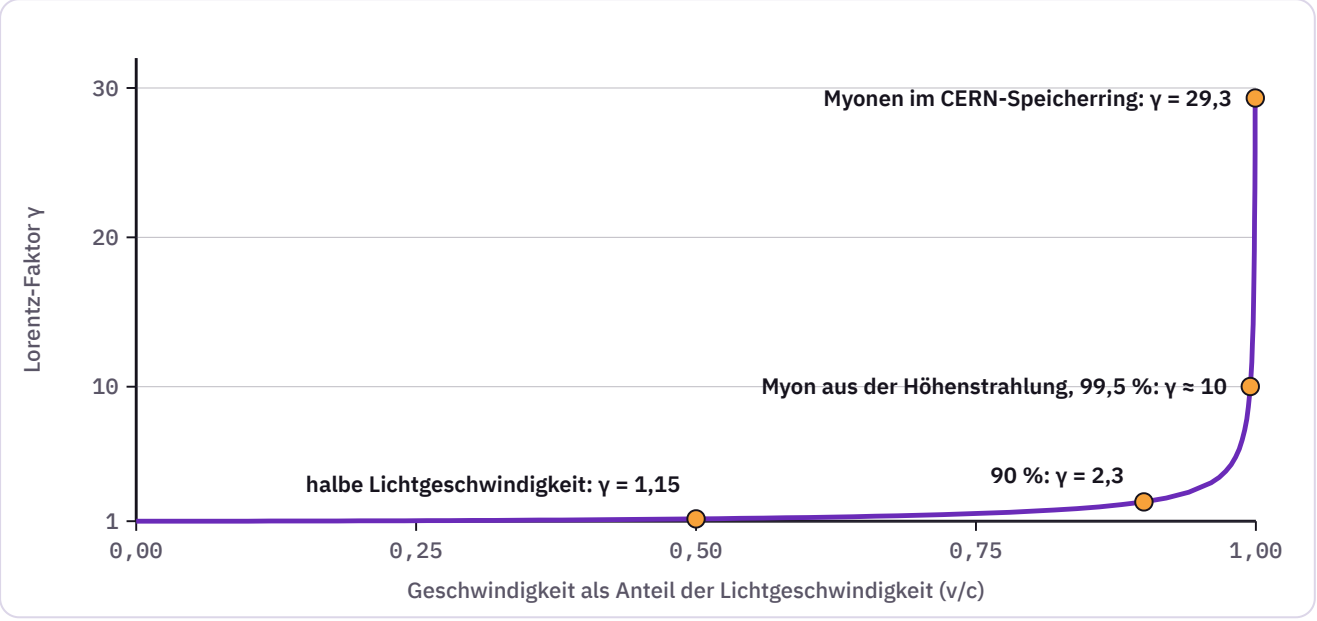


Abb. 1: Lorentz-Faktor γ nach Gleichung (1). Um diesen Faktor geht eine bewegte Uhr langsamer. Eigene Berechnung und Darstellung, Messpunkt CERN nach [6].

Die Natur liefert dazu ein Experiment frei Haus. Wenn Teilchen aus dem Weltall auf die obere Atmosphäre prallen, entstehen Myonen, schwere Verwandte des Elektrons. Ein ruhendes Myon zerfällt im Mittel nach 2,2 Mikrosekunden [7]. Selbst mit 99,5 Prozent der Lichtgeschwindigkeit käme es in dieser Zeit nur etwa 660 Meter weit, bevor es im Mittel zerfällt. Trotzdem erreichen energiereiche Myonen den Erdboden [8]. Für uns lebt ein solches Myon wegen $\gamma \approx 10$ zehnmal länger und fliegt im Mittel rund 6,6 Kilometer (eigene Rechnung). Am CERN hat man das 1977 genau nachgemessen: Myonen, die in einem Speicherring mit $\gamma = 29{,}33$ kreisten, lebten im Mittel 64,4 statt 2,2 Mikrosekunden, in Übereinstimmung mit Einsteins Formel auf zwei Promille genau [6].

Es geht auch mit Flugzeugen. Im Oktober 1971 nahmen Joseph Hafele und Richard Keating vier Cäsium-Atomuhren mit auf Linienflüge einmal ostwärts und einmal westwärts um die Erde und verglichen sie danach mit den Uhren am Boden. Ostwärts gingen die Flugzeuguhren 59 Nanosekunden nach, westwärts 273 Nanosekunden vor. Vorhergesagt hatten die beiden −40 und +275 Nanosekunden, jeweils mit Unsicherheiten von gut zwanzig Nanosekunden [9],[10]. In der Vorhersage stecken schon beide Effekte: die Geschwindigkeit, die die Uhren bremst, und die geringere Schwerkraft in Reiseflughöhe, die sie beschleunigt. Dazu weiter unten mehr.

Und das berühmte Zwillingsparadoxon? Wer mit einer Rakete fast lichtschnell zu einem Stern und zurück fliegt, kommt jünger zurück als die Schwester, die zu Hause geblieben ist. Ein Widerspruch ist das nicht, denn die beiden Zwillinge sind nicht gleichberechtigt: Nur einer von ihnen bremst, wendet und beschleunigt wieder.

E = mc²: Masse ist gespeicherte Energie

Wenige Monate nach der großen Arbeit schickte Einstein drei Seiten an die *Annalen der Physik* hinterher. In der heute berühmten Form steht die Formel dort gar nicht. Einstein schreibt, dass ein Körper, der die Energie L als Strahlung abgibt, an Masse um L/V^2 abnimmt, wobei V bei ihm die Lichtgeschwindigkeit ist [11]. Masse ist also eine Form von Energie, und weil c^2 eine riesige Zahl ist, steckt in wenig Masse sehr viel davon:

$$E = mc^2 \quad \Rightarrow \quad 0{,}001\,\mathrm{kg} \cdot \left(\,299\,792\,458\,\mathrm{m/s}\,\right)^2 \approx 9{,}0 \cdot 10^{13}\,\mathrm{J} \tag{2}$$

Das sind rund 25 Gigawattstunden, so viel, wie ein Kraftwerk mit einem Gigawatt Leistung in gut einem Tag liefert (eigene Rechnung). In Kernkraftwerken und in der Sonne wird jeweils nur ein kleiner Bruchteil der Masse in Energie umgewandelt, weniger als ein Prozent. Vollständig zerstrahlen kann Masse nur, wenn Materie auf Antimaterie trifft.

Raum und Zeit werden eins

Der Mathematiker Hermann Minkowski erkannte, dass sich die neue Physik am elegantesten beschreiben lässt, wenn man Raum und Zeit nicht mehr getrennt betrachtet. In einem Vortrag in Köln im September 1908 erklärte er, Raum für sich und Zeit für sich würden zu bloßen Schatten, nur eine Verbindung beider bleibe selbstständig [12]. Aus dieser vierdimensionalen **Raumzeit** wurde später die Bühne, auf der die allgemeine Relativitätstheorie spielt.

Schwerkraft als Krümmung

Die spezielle Relativitätstheorie hatte eine Lücke: Sie sagte nichts über die Schwerkraft. Den Schlüssel fand Einstein 1907. In einem Übersichtsartikel stellte er fest, dass sich ein gleichmäßig beschleunigter Kasten und ein Kasten, der ruhig in einem Schwerefeld steht, von innen nicht unterscheiden lassen [13]. Wer im fensterlosen Fahrstuhl frei fällt, ist schwerelos, als wäre die Gravitation abgeschaltet. Dieses Äquivalenzprinzip hat eine überraschende Folge: Schwerkraft verhält sich gar nicht wie eine Kraft, sondern wie eine Eigenschaft von Raum und Zeit selbst.

Acht Jahre und viele Umwege später, im November 1915, legte Einstein der Preußischen Akademie der Wissenschaften in Berlin die fertigen Feldgleichungen vor [14]. In heutiger Schreibweise, ohne die später ergänzte kosmologische Konstante, lauten sie:

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu} \tag{3}$$

Links steht, wie stark die Raumzeit gekrümmt ist, rechts, wie viel Masse, Energie und Druck sich an einem Ort befinden. *G* ist die Gravitationskonstante. Eine Woche zuvor hatte Einstein mit einer Vorstufe der Theorie ein Rätsel gelöst, das die Astronomen seit Jahrzehnten beschäftigte: Der sonnennächste Punkt der Merkurbahn wandert pro Jahrhundert um rund 43 Bogensekunden weiter, als es die Störungen durch die anderen Planeten erklären. Einsteins Rechnung ergab genau diesen Wert [15]. Die vollständige Darstellung der Theorie erschien 1916 [3].

Großes Aufsehen erregte eine zweite Vorhersage. Licht von Sternen, das dicht an der Sonne vorbeiläuft, sollte um 1,75 Bogensekunden abgelenkt werden, doppelt so stark, wie es eine Rechnung nach Newton ergibt. Bei der Sonnenfinsternis vom 29. Mai 1919 fotografierten britische Expeditionen in Sobral (Brasilien) und auf der Insel Príncipe die Sterne neben der verdunkelten Sonne. Ihr Ergebnis passte zu Einstein, wenn auch mit Messunsicherheiten, die nach heutigen Maßstäben groß waren [16]. Heutige Tests sind ungleich genauer. Der Satellit MICROSCOPE hat zweieinhalb Jahre lang im Erdorbit geprüft, ob Körper aus Titan und Platin gleich schnell fallen. Sie tun es, auf etwa ein Billiardstel genau (10^{-15}) [17].

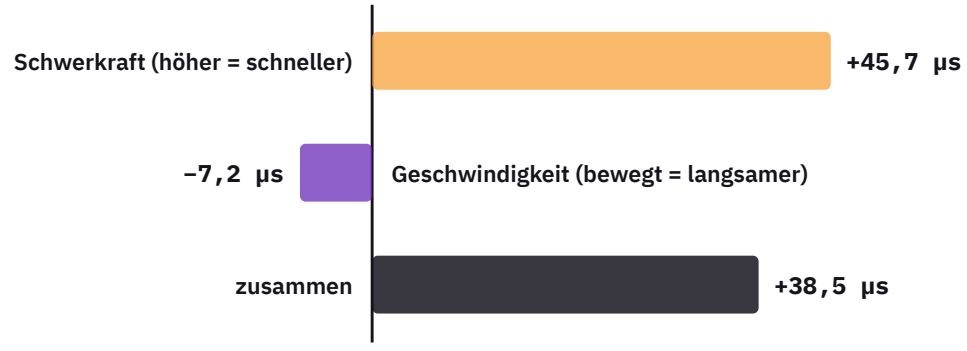
Uhren im Erdgeschoss gehen nach

Aus der allgemeinen Relativitätstheorie folgt, dass Uhren tiefer im Schwerefeld langsamer laufen. Nahe der Erdoberfläche gilt für den relativen Gangunterschied zweier Uhren, deren Höhe sich um h unterscheidet, näherungsweise:

$$\frac{\Delta f}{f} \approx \frac{g \cdot h}{c^2} \quad \Rightarrow \quad \frac{9{,}81\ \mathrm{m/s^2} \cdot 1\ \mathrm{m}}{\left(3 \cdot 10^8\ \mathrm{m/s}\right)^2} \approx 1{,}1 \cdot 10^{-16} \tag{4}$$

Ein Meter Höhenunterschied macht also etwa 1 zu 10 Billiarden aus (eigene Rechnung). Robert Pound und Glen Rebka wiesen den Effekt 1960 erstmals im Labor nach, mit Gammastrahlung, die sie im Turm des Jefferson-Labors der Harvard-Universität über 22,6 Meter Höhe nach oben und unten schickten [18],[19]. 2010 genügten am NIST in Boulder zwei optische Atomuhren, von denen eine 33 Zentimeter höher stand [20],[21], und 2022 zeigte eine Forschungsgruppe den Unterschied innerhalb einer einzigen Atomwolke von einem Millimeter Größe [1]. Wer im obersten Stock eines hundert Meter hohen Hochhauses wohnt, altert in achtzig Jahren um rund 28 Mikrosekunden schneller als jemand im Erdgeschoss (eigene Rechnung). Wie solche Uhren funktionieren, steht im Artikel über Atomuhren.

Ohne beide Relativitätstheorien würde Ihr Navi nicht funktionieren. Die Satelliten des GPS kreisen in rund 20 200 Kilometern Höhe mit knapp vier Kilometern pro Sekunde (eigene Rechnung aus dem Bahnradius von rund 26 560 Kilometern). Die schwächere Schwerkraft dort oben lässt ihre Uhren schneller laufen, die Geschwindigkeit bremst sie. Unterm Strich gingen sie ohne Korrektur pro Tag rund 38 Mikrosekunden vor (Abb. 2). Weil ein GPS-Empfänger seine Entfernung zu den Satelliten aus Signallaufzeiten berechnet, entspräche das einem Fehler im Laufweg von gut elf Kilometern pro Tag (eigene Rechnung). Die Satellitenuhren werden deshalb schon vor dem Start mit einer leicht verringerten Frequenz eingestellt, damit sie im Orbit im Takt der Uhren am Boden laufen [22].



Gangabweichung einer GPS-Uhr gegenüber einer Uhr am Boden, pro Tag

`38,5 µs × Lichtgeschwindigkeit ≈ 11,5 km`

Abb. 2: Relativistische Gangabweichung einer GPS-Satellitenuhr gegenüber einer Uhr am Erdboden pro Tag, ohne die kleinen Beiträge von Erddrehung und Bahnform. Eigene Berechnung mit Bahnradius 26 560 km, Prinzip nach [22].

Wellen in der Raumzeit

Schon 1916 folgerte Einstein aus seinen Gleichungen, dass sich Störungen der Raumzeit als Wellen mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten müssten [23]. Er hielt sie für viel zu schwach, um sie je zu messen. Am 14. September 2015 registrierten die beiden LIGO-Detektoren in den USA trotzdem ein solches Signal. Es stammte von zwei Schwarzen Löchern mit etwa 36 und 29 Sonnenmassen, die in rund 1,3 Milliarden Lichtjahren Entfernung (410 Megaparsec) verschmolzen waren und dabei rund drei Sonnenmassen in Form von Gravitationswellen abstrahlten [24].

Seitdem wurden viele weitere solcher Verschmelzungen gemessen. Das deutlichste Signal bis zu seiner Auswertung, GW250114, traf am 14. Januar 2025 ein. Die Auswertung erschien im Januar 2026: Das neu entstandene Schwarze Loch „klingelte“ nach der Verschmelzung in den Tönen, die Einsteins Theorie für ein rotierendes Schwarzes Loch vorhersagt, im Rahmen einer Messgenauigkeit von einigen zehn Prozent, und alle Tests stimmten mit der allgemeinen Relativitätstheorie überein [25],[26]. 2019 zeigte das Event Horizon Telescope zudem das erste Bild vom Schatten eines Schwarzen Lochs, im Zentrum der Galaxie M87, mit der Größe, die die Theorie erwarten lässt [27]. Mehr dazu im Artikel über Schwarze Löcher.

Wo Relativität und Quanten zusammentreffen

Die spezielle Relativitätstheorie und die Quantenphysik vertragen sich gut, wenn auch nicht von selbst. 1928 stellte Paul Dirac eine Gleichung für das Elektron auf, die beiden Theorien gerecht wird. Aus ihr ergab sich der Spin des Elektrons ganz ohne Zusatzannahme [28], und sie hatte Lösungen, die Dirac 1931 als Teilchen mit entgegengesetzter Ladung deutete [29]. Kurz darauf fand Carl Anderson in der Höhenstrahlung das Positron, das erste Teilchen der Antimaterie [30]. Aus dieser Verbindung ist die Quantenfeldtheorie gewachsen, die Sprache der heutigen Teilchenphysik.

Auch im Alltag hinterlässt die Verbindung Spuren. Elektronen in der Nähe schwerer Atomkerne bewegen sich so schnell, dass relativistische Effekte ihre Bahnen verändern. Deshalb ist Gold gelb und nicht silbrig wie die meisten Metalle [31], und deshalb ist Quecksilber bei Zimmertemperatur flüssig: Ohne diese Effekte läge sein Schmelzpunkt nach Rechnungen einer Gruppe mit Beteiligung der Universität Heidelberg rund 105 Grad höher [32],[33].

Mit der allgemeinen Relativitätstheorie ist es schwieriger. Sie beschreibt eine glatte, stetige Raumzeit, die Quantenphysik eine Welt aus Sprüngen, Wahrscheinlichkeiten und Unschärfe. Wo beides zugleich wichtig wird, im Inneren Schwarzer Löcher oder im allerersten Augenblick des Universums, liefern die Theorien zusammen keine sinnvollen Antworten mehr. Eine Theorie der Quantengravitation, die beides vereint, gibt es noch nicht. Einen ersten Hinweis, wie sie aussehen könnte, gab Stephen Hawking 1974 mit seiner Vorhersage, dass Schwarze Löcher strahlen [34].

Übrigens: Den Nobelpreis bekam Einstein nicht für die Relativitätstheorie. Das Nobelkomitee zeichnete ihn für das Jahr 1921 für seine Verdienste um die theoretische Physik aus, ausdrücklich aber für die Erklärung des Fotoeffekts [35], mit der er gezeigt hatte, dass Licht aus Quanten besteht. Mehr über sein Leben steht im Porträt Albert Einstein und die Quanten.

Ist die Relativitätstheorie bewiesen?

Streng genommen lässt sich keine physikalische Theorie beweisen, man kann sie nur prüfen. Die Relativitätstheorie hat jeden Test bestanden, vom Myon bis zum verschmelzenden Schwarzen Loch, und sie steckt in Technik, die Sie täglich benutzen. Sicher ist aber auch, dass sie nicht das letzte Wort sein kann, solange sie sich nicht mit der Quantenphysik verträgt. Wo genau sie an ihre Grenzen stößt, weiß heute niemand. Wer mit immer genaueren Uhren und Gravitationswellen-Detektoren nach Abweichungen sucht, hofft deshalb auf einen Riss in Einsteins Theorie, denn er wäre ein Hinweis auf die gesuchte tiefere Theorie. Gefunden hat ihn bisher niemand.

Zum Weiterlesen

Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie

Albert Einstein · Springer, 24. Auflage 2009 · ISBN 978-3-540-87776-9

Einsteins eigene „gemeinverständliche“ Darstellung von 1917, für Leser ohne höhere Mathematik geschrieben. Erstaunlich gut lesbar und kurz.

Bei Amazon ansehen*

* Werbelink: Kaufen Sie über diesen Link, erhalten wir von Amazon eine kleine Provision, am Preis ändert sich für Sie nichts. Mehr Empfehlungen auf unserer Seite Bücher zur Quantenphysik.

Quellen

1. T. Bothwell, C. J. Kennedy, A. Aeppli, D. Kedar, J. M. Robinson, E. Oelker, A. Staron, J. Ye: *Resolving the gravitational redshift across a millimetre-scale atomic sample.* In: Nature 602 (2022), S. 420–424, doi:10.1038/s41586-021-04349-7.
2. A. Einstein: *Zur Elektrodynamik bewegter Körper.* In: Annalen der Physik 322 (1905), S. 891–921, doi:10.1002/andp.19053221004.

3. A. Einstein: *Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie.* In: Annalen der Physik 354 (1916), S. 769–822, doi:10.1002/andp.19163540702.
4. A. A. Michelson, E. W. Morley: *On the relative motion of the Earth and the luminiferous ether.* In: American Journal of Science s3-34 (1887), S. 333–345, doi:10.2475/ajs.s3-34.203.333.
5. Bureau International des Poids et Mesures (BIPM): *The International System of Units (SI).* SI-Broschüre, 9. Auflage, bipm.org/en/publications/si-brochure.
6. J. Bailey, K. Borer, F. Combley, H. Drumm, F. Krienen, F. Lange, E. Picasso, W. von Ruden u. a.: *Measurements of relativistic time dilatation for positive and negative muons in a circular orbit.* In: Nature 268 (1977), S. 301–305, doi:10.1038/268301a0.
7. Particle Data Group: *Review of Particle Physics*, Ausgabe 2026, Eintrag „μ mean life“, pdglive.lbl.gov/view/S004T.
8. J. Alvarez-Muñiz, Z. Cao, U. F. Katz, P. Mertsch, C. Spiering: *Cosmic Rays.* In: Particle Data Group, Review of Particle Physics, überarbeitet im Oktober 2025, pdg.lbl.gov.
9. J. C. Hafele, R. E. Keating: *Around-the-World Atomic Clocks: Predicted Relativistic Time Gains.* In: Science 177 (1972), S. 166–168, doi:10.1126/science.177.4044.166.
10. J. C. Hafele, R. E. Keating: *Around-the-World Atomic Clocks: Observed Relativistic Time Gains.* In: Science 177 (1972), S. 168–170, doi:10.1126/science.177.4044.168.
11. A. Einstein: *Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?* In: Annalen der Physik 323 (1905), S. 639–641, doi:10.1002/andp.19053231314.
12. H. Minkowski: *Raum und Zeit.* Vortrag auf der 80. Versammlung Deutscher Naturforscher und Ärzte, Köln, 21. September 1908. Sonderabdruck aus dem 18. Band der Jahresberichte der Deutschen Mathematiker-Vereinigung, B. G. Teubner, Leipzig und Berlin 1909.
13. A. Einstein: *Über das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerungen.* In: Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik 4 (1907), S. 411–462.
14. A. Einstein: *Die Feldgleichungen der Gravitation.* In: Sitzungsberichte der Königlich Preußischen Akademie der Wissenschaften, Berlin 1915, S. 844–847.
15. A. Einstein: *Erklärung der Perihelbewegung des Merkur aus der allgemeinen Relativitätstheorie.* In: Sitzungsberichte der Königlich Preußischen Akademie der Wissenschaften, Berlin 1915, S. 831–839.
16. F. W. Dyson, A. S. Eddington, C. Davidson: *A determination of the deflection of light by the sun’s gravitational field, from observations made at the total eclipse of May 29, 1919.* In: Philosophical Transactions of the Royal Society A 220 (1920), S. 291–333, doi:10.1098/rsta.1920.0009.
17. P. Touboul, G. Métris, M. Rodrigues u. a.: *MICROSCOPE Mission: Final Results of the Test of the Equivalence Principle.* In: Physical Review Letters 129 (2022), 121102, doi:10.1103/PhysRevLett.129.121102.
18. R. V. Pound, G. A. Rebka: *Apparent Weight of Photons.* In: Physical Review Letters 4 (1960), S. 337–341, doi:10.1103/PhysRevLett.4.337.
19. C. M. Will: *The Confrontation between General Relativity and Experiment.* In: Living Reviews in Relativity 17 (2014), 4, doi:10.12942/lrr-2014-4.
20. C. W. Chou, D. B. Hume, T. Rosenband, D. J. Wineland: *Optical Clocks and Relativity.* In: Science 329 (2010), S. 1630–1633, doi:10.1126/science.1192720.
21. NIST: *NIST Pair of Aluminum Atomic Clocks Reveal Einstein’s Relativity at a Personal Scale.* Pressemitteilung vom 23. September 2010, nist.gov.
22. N. Ashby: *Relativity in the Global Positioning System.* In: Living Reviews in Relativity 6 (2003), 1, doi:10.12942/lrr-2003-1.
23. A. Einstein: *Näherungsweise Integration der Feldgleichungen der Gravitation.* In: Sitzungsberichte der Königlich Preußischen Akademie der Wissenschaften, Berlin 1916, S. 688–696.

24. LIGO Scientific Collaboration und Virgo Collaboration (B. P. Abbott u. a.): *Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger.* In: Physical Review Letters 116 (2016), 061102, doi:10.1103/PhysRevLett.116.061102.
25. LIGO Scientific Collaboration, Virgo Collaboration und KAGRA Collaboration (A. G. Abac u. a.): *Black Hole Spectroscopy and Tests of General Relativity with GW250114.* In: Physical Review Letters 136 (2026), 041403, doi:10.1103/6c61-fm1n.
26. Max-Planck-Gesellschaft: *Testing Einstein's theory of relativity with the clearest gravitational-wave signal yet.* Pressemitteilung vom 29. Januar 2026, mpg.de.
27. Event Horizon Telescope Collaboration (K. Akiyama u. a.): *First M87 Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole.* In: The Astrophysical Journal Letters 875 (2019), L1, doi:10.3847/2041-8213/ab0ec7.
28. P. A. M. Dirac: *The quantum theory of the electron.* In: Proceedings of the Royal Society A 117 (1928), S. 610–624, doi:10.1098/rspa.1928.0023.
29. P. A. M. Dirac: *Quantised singularities in the electromagnetic field.* In: Proceedings of the Royal Society A 133 (1931), S. 60–72, doi:10.1098/rspa.1931.0130.
30. C. D. Anderson: *The Positive Electron.* In: Physical Review 43 (1933), S. 491–494, doi:10.1103/PhysRev.43.491.
31. P. Pyykkö: *Relativistic effects in structural chemistry.* In: Chemical Reviews 88 (1988), S. 563–594, doi:10.1021/cr00085a006.
32. F. Calvo, E. Pahl, M. Wormit, P. Schwerdtfeger: *Evidence for Low-Temperature Melting of Mercury owing to Relativity.* In: Angewandte Chemie International Edition 52 (2013), S. 7583–7585, doi:10.1002/anie.201302742.
33. Universität Heidelberg: *Why Is Mercury Liquid at Room Temperature?* Pressemitteilung Nr. 195/2013 vom 27. August 2013, uni-heidelberg.de.
34. S. W. Hawking: *Black hole explosions?* In: Nature 248 (1974), S. 30–31, doi:10.1038/248030a0.
35. Nobelstiftung: *Albert Einstein – Facts.* The Nobel Prize in Physics 1921, nobelprize.org.

Zitiervorschlag

quanten.de: *Relativitätstheorie einfach erklärt: Was Einstein über Raum und Zeit herausfand.* Stand: November 2026. URL: https://quanten.de/relativitaetstheorie.html

Texte und Abbildungen © 2026 quanten.de. Nutzung mit Quellenangabe und Link gern, kommerzielle Nutzung nach Absprache: info@quanten.de

Weiterlesen: Schwarze Löcher · Atomuhren · Quantengravitation · Albert Einstein