

REPRINTED FROM:

---

THE COLLECTED PAPERS OF

---

# Albert Einstein

---

VOLUME 7

---

THE BERLIN YEARS:  
WRITINGS, 1918–1921

Michel Janssen, Robert Schulmann, József Illy, Christoph Lehner,  
and Diana Kormos Buchwald

EDITORS

Daniel Kennefick, A. J. Kox, and David Rowe

ASSOCIATE EDITORS

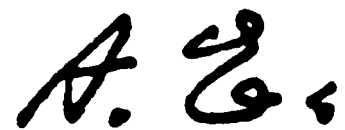
R. Hirschmann, O. Moses, A. Mynttinen, A. Pringle, and R. Fountain

EDITORIAL ASSISTANTS

DOC. 25

“What Is the Theory of Relativity?”

(pp. 206–211)



Princeton University Press

2002

## 25. “What Is the Theory of Relativity?”

[before 28 November 1919]<sup>[1]</sup>

### Was ist Relativitäts-Theorie?

⟨ Der Aufforderung ⟩ Dem Ersuchen Ihres Mitarbeiters, für die „Times“ etwas über „Relativität“ zu schreiben, komme ich gerne nach. Denn nach dem beklagenswerten Zusammenbruch der früheren regen internationalen Beziehungen der Gelehrten ist mir dies eine willkommene, ja die einzige ⟨ Veranlassung ⟩ Gelegenheit, meinem Gefühl der Freude und Dankbarkeit den englischen Astronomen und Physikern gegenüber auszusprechen. Es entspricht ganz den grossen und stolzen Traditionen der wissenschaftlichen Arbeit in Ihrem Lande, dass ⟨ Ihre besten Männer ihrer ⟩ bedeutende Forscher viel Zeit und Mühe, Ihre wissenschaftlichen Institute grosse materielle Mittel aufwendeten,<sup>[2]</sup> um eine Folgerung einer Theorie zu prüfen, die im Lande Ihrer Feinde während des Krieges vollendet und publiziert ⟨ , wenn auch nicht ⟩ worden ist. Wenn es sich bei der Untersuchung des Einflusses des Gravitationsfeldes der Sonne auf die Lichtstrahlen auch um eine rein objektive Angelegenheit handelte, so ⟨ kann ich doch nicht anders ⟩ drängt es mich doch, den englischen Fachgenossen auch meinen persönlichen Dank für ihr Werk zu sagen; denn ohne dasselbe hätte ich die Prüfung der wichtigsten Konsequenz meiner Theorie wohl nicht mehr erlebt.—<sup>[3]</sup>

Man kann in der Physik Theorien verschiedener Art unterscheiden. Die ⟨ Theorien erster Art nenne ich ⟩ meisten sind konstruktive Theorien. Diese suchen aus einem relativ einfachen zu grunde gelegten Formalismus ein Bild der komplexeren Erscheinungen zu konstruieren. So sucht die kinetische Gastheorie die mechanischen, thermischen und Diffusionsvorgänge auf Bewegungen der Moleküle zurückzuführen, d. h. aus der Hypothese der Molekularbewegung zu konstruieren. Wenn man sagt, es sei gelungen, eine Gruppe von Naturvorgängen zu begreifen, so meint man damit immer, dass eine konstruktive Theorie gefunden sei, die die betreffenden Vorgänge umfasst.

Es gibt aber neben dieser wichtigsten Klasse von Theorien eine zweite, ich will sie Prinzip-Theorien nennen. Diese bedienen sich nicht der synthetischen sondern der analytischen Methode. Ausgangspunkt und Basis bilden nicht hypothetische Konstruktionselemente sondern empirisch gefundene allgemeine Eigenschaften der Naturvorgänge (Prinzipie), aus denen dann mathematisch formulierte Kriterien folgen, denen die einzelnen Vorgänge bzw. deren theoretische Bilder zu genügen haben. So sucht die Thermodynamik aus dem allgemeinen Erfahrungsergebnis, dass

ein perpetuum mobile unmöglich sei, auf analytischem Wege Bedingungen zu ermitteln, denen die einzelnen Vorgänge genügen müssen.

Vorzug der konstruktiven Theorien ist Vollständigkeit, Anpassungsfähigkeit und Anschaulichkeit, Vorzug der Prinzip-Theorien ist logische Vollkommenheit und Sicherheit der Grundlage.<sup>[4]</sup>

Die Relativitätstheorie gehört zu den Prinziptheorien. Um ihr Wesen zu erfassen, muss man also in erster Linie die Prinzipie kennen lernen, auf denen sie beruht. Bevor ich auf diese eingehe muss ich aber bemerken, dass die Relativitätstheorie einem Gebäude gleicht, das aus zwei gesonderten Stockwerken besteht, der speziellen und der allgemeinen Relativitätstheorie. Die spezielle Relativitätstheorie, auf welcher die allgemeine ruht, bezieht sich auf alle physikalischen Vorgänge mit Ausschluss der Gravitation; die allgemeine Relativitätstheorie liefert das Gesetz der Gravitation und deren Relationen zu den andern Naturkräften.

Seit dem griechischen Altertum ist es wohlbekannt, dass es zur Beschreibung der Bewegung eines Körpers eines zweiten Körpers bedarf, auf welchen die Bewegung des ersten bezogen wird. ( Auch die Physik) Die Bewegung eines Wagens wird auf den Erdboden bezogen, die eines Planeten auf die Totalität der sichtbaren Fixsterne. In der Physik nennt man den Körper, auf den man die Vorgänge räumlich bezieht, Koordinatensystem. Es können z. B. die Gesetze der Mechanik von Galilei und Newton nur unter Benutzung eines Koordinatensystems formuliert werden.

Der Bewegungszustand des Koordinatensystems darf aber nicht willkürlich gewählt werden, wenn die Gesetze der Mechanik gelten sollen (es muss „drehungsfrei“ und „beschleunigungsfrei“ sein). Man nennt ein in der Mechanik zugelassenes Koordinatensystem ein „Inertialsystem“. Der Bewegungszustand eines Inertialsystems ist aber nach der Mechanik kein durch die Natur eindeutig bestimmter. Es gilt vielmehr der Satz: Ein relativ zu einem Inertialsystem gradlinig und gleichförmig bewegtes Koordinatensystem ist ebenfalls ein Inertialsystem. Unter dem „speziellen Relativitätsprinzip“ versteht man nun die Verallgemeinerung dieses Satzes auf beliebige Naturvorgänge: Jedes allgemeine Naturgesetz, welches in bezug auf ein Koordinatensystem  $K$  gilt, muss auch unverändert gelten in bezug auf ein Koordinatensystem  $K'$ , welches relativ zu  $K$  in gleichförmiger Translationsbewegung ist.

Das zweite Prinzip, auf dem die spezielle Relativitätstheorie beruht, ist das „Prinzip von der Konstanz der Vakuum-Lichtgeschwindigkeit“. Dieses sagt: Das Licht hat im Vakuum stets eine bestimmte Ausbreitungs-Geschwindigkeit  $c$  (unabhängig vom Bewegungszustand der Lichtquelle).<sup>[5]</sup> Das Vertrauen, welches der Physiker diesem Satz entgegenbringt, stammt aus den Erfolgen der Maxwell-Lorentz'schen Elektrodynamik.

Die beiden genannten Prinzipien sind durch die Erfahrung mächtig gestützt, scheinen aber logisch miteinander nicht vereinbar zu sein. Ihre logische Vereinigung gelang schliesslich der speziellen Relativitätstheorie durch eine Abänderung der Kinematik, d. h. der Lehre von den Gesetzen, die Raum und Zeit (vom physikalischen Standpunkt aus) betreffen. Es zeigte sich dass die Aussage der Gleichzeitigkeit zweier Ereignisse nur in bezug auf ein Koordinatensystem Sinn habe, dass die Gestalt von Messkörpern und die Ganggeschwindigkeit von Uhren von deren Bewegungszustand zum Koordinatensystem abhängen müsse.

Die alte Physik inklusive der Galilei-Newton'schen Bewegungs-Gesetze passten aber nicht zu der angedeuteten relativistischen Kinematik. Aus letzterer flossen allgemeine mathematische Bedingungen, denen die Naturgesetze entsprechen mussten, wenn die beiden genannten allgemeinen Prinzipien wirklich zutreffen sollten. Diesen musste die Physik angepasst werden. Insbesondere gelangte man zu einem neuen Bewegungsgesetz für (rasch bewegte) Massenpunkte, welches an elektrisch geladenen Teilchen vortrefflich bestätigt wurde. Das wichtigste Ergebnis der speziellen Relativitätstheorie betraf die träge Masse körperlicher Systeme. Es ergab sich, dass die Trägheit eines Systems von seinem Energieinhalt abhängen müsse, und man gelangte geradezu zu der Auffassung, dass träge Masse nichts anderes sei als latente Energie. Der Satz von der Erhaltung der Masse verlor seine Selbständigkeit und verschmolz mit dem von der Erhaltung der Energie.

Die spezielle Relativitäts-Theorie, welche nichts anderes war als eine systematische Fortsetzung der Maxwell-Lorentz'schen Elektrodynamik, wies aber über sich selbst hinaus. Sollte die Unabhängigkeit der physikalischen Gesetze vom Bewegungszustand des Koordinatensystems auf gleichförmige Translationsbewegungen der Koordinatensysteme zu einander beschränkt sein? Was hat die Natur mit den von uns eingeführten Koordinatensystemen und deren Bewegungszustand zu thun? Wenn es schon für die Naturbeschreibung nötig ist, sich eines von uns willkürlich eingeführten Koordinatensystems zu bedienen, so sollte die Wahl von dessen Bewegungszustand keiner Beschränkung unterworfen sein; die Gesetze sollten von dieser Wahl ganz unabhängig sein (Allgemeines Relativitäts Prinzip).

Die Durchführung dieses allgemeinen Relativitätsprinzips wird nahe gelegt durch eine längst bekannte Erfahrung, nach welcher die Schwere  $\langle$  alle Körpern dieselbe Beschleunigung erteilt.) und die Trägheit eines Körpers durch dieselbe Konstante beherrscht wird (Gleichheit der trägen und schweren Masse). Man denke etwa an ein Koordinatensystem, welches relativ zu einem Inertialsystem im Sinne Newtons in gleichförmiger Rotation begriffen ist. Die relativ zu diesem System auftretenden Zentrifugalkräfte müssen im Sinne von Newtons Lehre als  $\langle$  Trägheitskräfte  $\rangle$  Wirkungen der Trägheit aufgefasst werden. Diese Zentrifugalkräfte sind aber genau wie die Schwerewirkungen<sup>[6]</sup> proportional der Masse der Körper. Sollte

es da nicht möglich sein, das Koordinatensystem als ruhend und die Zentrifugalkräfte als Gravitationskräfte aufzufassen? Die Auffassung liegt nahe, aber die klassische Mechanik verbietet es.

Diese flüchtige Überlegung lässt ahnen, dass eine allgemeine Relativitätstheorie die Gesetze der Gravitation liefern muss, und die konsequente Verfolgung des Gedankens hat die Hoffnung gerechtfertigt.

Aber der Weg war schwerer als man denken sollte, weil er das Aufgeben der Euklidischen Geometrie verlangte. Dies bedeutet: Die Gesetze, nach welchen sich die festen Körper im Raume anordnen lassen, stimmen nicht genau überein mit den Lagerungsgesetzen, welche die euklidische Geometrie den Körpern zuschreibt. Dies meint man, wenn man von „Krümmung des Raumes“ redet. Die Grundbegriffe „Gerade“, „Ebene“ etc. verlieren dadurch ihre exakte Bedeutung in der Physik.

In der allgemeinen Relativitätstheorie spielt die Lehre von Raum und Zeit, die Kinematik nicht mehr die Rolle eines von der übrigen Physik unabhängigen Fundamentes. Das geometrische Verhalten der Körper und der Gang der Uhren hängt vielmehr von den Gravitationsfeldern ab, die selbst wieder von der Materie erzeugt sind.

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 schwer fällt, 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.

Niemand aber soll denken, dass durch diese oder irgend eine andere Theorie Newtons grosse Schöpfung im eigentlichen Sinne verdrängt werden könnte. Seine klaren und grossen Ideen werden als Fundament unserer ganzen modernen Begriffsbildung auf dem Gebiete der natural philosophie ihre eminente Bedeutung in aller Zukunft behalten.<sup>[7]</sup>

Albert Einstein

---

Zusätzliche Bemerkung. Die meine Person und Lebensverhältnisse betreffenden Bemerkungen Ihrer Zeitung zeugen zum Teil von erfreulicher Phantasie des Verfassers.<sup>[8]</sup> Noch eine Art Anwendung des Relativitätsprinzips zum Ergötzen des Lesers: < Als Autor einer aussichtsreichen Theorie > Heute werde ich < von deutschen Zeitungen > in Deutschland als „Deutscher < Forscher > Gelehrter“ < von englischen > in England als „Schweizer Jude“ bezeichnet; < glauben Sie nicht, dass diese Titulaturen ihren Platz vertauschen würden, wenn ich einst den geschätzten Lesern der beiden Länder als „bête noire“ vorgestellt werden müsste? > sollte ich aber einst in die Lage kommen, < den Zeitungslesern der beiden Länder > als „bête noire“ präsentiert zu werden, dann wäre ich umgekehrt für die Deutschen ein „Schweizer Jude“, für die Engländer ein „deutscher Gelehrter“ < sein >.<sup>[9]</sup>

ADS. [1 002]. The document consists of seven pages numbered in the upper right-hand corner. Numbering is here provided in the margin in square brackets. First published in English as *Einstein 1919f* (Doc. 26). A typescript [1 003] with minor modifications is also available and was published in *Einstein 1934a*, pp. 127–131.

<sup>[1]</sup>After preliminary reports on the results of the British solar eclipse expeditions had appeared in the press, including *Einstein 1919d* [Doc. 23], the final results were officially announced at the joint meeting of the Royal Society and the Royal Astronomical Society in Burlington House on 6 November 1919. On the latter event, see the Introduction, p. xxx, *Observatory* 42 (1919): 389–398, *Crommelin 1919*, and *The Times* (London), 7 November 1919, p. 12. As a result of “the very wide scientific and popular interest in the difficult subject,” Einstein agreed to give a brief account of his theory and its implications to the Berlin correspondent of *The Times* (as reported in *The Times* [27 November 1919], p. 14). On subsequent disputes over whether the British results confirmed general relativity, see *Earman and Glymour 1980a*. On the reporting in the popular press, particularly in England and the United States, see *Elton 1986*.

<sup>[2]</sup>Four astronomers, Eddington among them, as well as auxiliary staff participated in the two expeditions. Frank W. Dyson (1868–1939), Astronomer Royal, had obtained a government grant of 1000 pounds for the expenses (see *Douglas 1957*, p. 39). This represents more than one-third of the total 1919 budget of the Royal Astronomical Society, which was 2700 pounds (see *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 80 [1919–1920]: 338–339). For discussion of the preparations, see *Eddington 1920a* and *Earman and Glymour 1980a*.

<sup>[3]</sup>He expressed the same motives for writing the article in Einstein to *Neue Freie Presse*, 6 December 1919.

<sup>[4]</sup>For an incipient version of this distinction, see Einstein to Arnold Sommerfeld, 14 January 1908 (Vol. 5, Doc. 73). See also Vol. 2, Introduction, pp. xxi–xxvi.

<sup>[5]</sup>In the typescript version, “und” is added between “Bewegungszustand” and “der Lichtquelle,” misreading the last three letters of the previous word. *Einstein 1934a* adds a “von” before “und,” compounding the mistake. Therefore, in the English translation, *Einstein 1934b*, the passage “independent of the velocity of its source” was changed to “independent of the state of motion of the observer or of the source of the light.” For the subsequent history of this mistake, see *Stachel 1987*.

<sup>[6]</sup>In the typescript version, “Schwerewirkungen” is changed to “Schwerekräfte.”

<sup>[7]</sup>Einstein felt compelled to soothe the uproar in British scientific circles and the popular press, which reported on his alleged destruction of Newton’s theory. At the House of Commons, Joseph Larmor (1857–1942), Professor of Physics at the University of Cambridge and its Representative in the Parliament, “was besieged by inquiries as to whether Newton had been cast down and Cambridge ‘done in’” (*The Times* [London], 8 November 1919, p. 12). When the preliminary findings of the expeditions were announced at the meeting of the British Association for the Advancement of Science in Bournemouth (see *Einstein 1919d* [Doc. 23], note 2), Oliver J. Lodge (1851–1940), Principal of the University of Birmingham, expressed his hopes that the final results would show a displacement

of 0.87", i.e., the value predicted by Newton's theory (see *The Observatory* 42 [1919]: 364). Frederick A. Lindemann (1886–1957), Professor of Experimental Philosophy at the University of Oxford and Head of its Clarendon Laboratory, informed Einstein in considerable detail about the resistance of several leading British scientists. He also added that reports in *The Times* of how relativity overturned Newton's theory had "wounded national feeling and greatly alarmed the world" ("hat . . . das national Gefühl verletzt & die Welt in grosse Aufregung versetzt"; Frederick A. Lindemann to Einstein, 23 November 1919). He received similar news from Ehrenfest (Paul Ehrenfest to Einstein, 24 November 1919).

<sup>[8]</sup>The reference is to a short note in *The Times* (London), 8 November 1919, p. 12, entitled "Dr. Albert Einstein," where he was called "a Swiss Jew." His academic appointments are listed as: "for some time professor in mathematical physics at the Polytechnic at Zurich, and then professor at Prague. Afterwards he was nominated a member of the Kaiser Wilhelm Academy for Research in Berlin." As to his political stance, "at the time of the Armistice he signed an appeal in favour of the German revolution. He is an ardent Zionist." The appeal in question may have been a call to join the Demokratische Partei. It was published in *Berliner Tageblatt* (16 November 1918) (see Vol. 8, Calendar 1918, p. 1029).

<sup>[9]</sup>Einstein enjoyed his own joke so much that he repeated it for the benefit of Ehrenfest (Einstein to Paul Ehrenfest, 4 December 1919). On its repercussions in the press, see Doc. 26, note 4.