



Albert Einstein: Akademie-Vorträge

Sitzungsberichte der Preußischen Akademie
der Wissenschaften 1914–1932

Herausgegeben von

Dieter Simon

Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften



WILEY-
VCH

WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA

Diese Seite wurde absichtlich leer gelassen

**Albert Einstein:
Akademie-Vorträge**

Herausgegeben von
Dieter Simon

**Beachten Sie bitte auch
weitere interessante Titel
zu diesem Thema**

Brian, D.

Einstein – Sein Leben

2005, Hardcover, 735 Seiten mit 20 Abbildungen, ISBN 3-527-40562-3

Renn, J. (Hrsg.)

Einstein's Annalen Papers

The Complete Collection 1901–1922

2005, Hardcover, 590 Seiten, ISBN 3-527-40564-X

Renn, J. (Hrsg.)

Albert Einstein – Ingenieur des Universums

Ausstellungskatalog und Dokumente mit DVD

2005, Hardcover, ca. 800 Seiten in 2 Bänden, ISBN 3-527-40569-0

Renn, J. (Hrsg.)

Albert Einstein – Ingenieur des Universums

Hundert Autoren für Einstein

2005, Hardcover, 472 Seiten, ISBN 3-527-40579-8

Braun, R., Krieger, D. (Hrsg.)

Einstein – Peace Now!

Visions and Ideas

2005, Hardcover, 313 Seiten, ISBN 3-527-40604-2

Renn, J.

Auf den Schultern von Riesen und Zwergen

Einsteins unvollendete Revolution

2005, Hardcover, 352 Seiten, ISBN 3-527-40595-X

Hoffmann, D.

Einsteins Berlin

Auf den Spuren eines Genies

2006, Broschur, ca. 150 Seiten mit ca. 30 Abbildungen, ISBN 3-527-40596-8

Brian, D.

The Unexpected Einstein

The Real Man Behind the Icon

2005, Hardcover, ca. 272 Seiten, ISBN 0-471-71840-8

Fox, K. C., Keck, A.

Einstein A to Z

2004, Softcover, 320 Seiten, ISBN 0-471-46674-3

Albert Einstein: Akademie-Vorträge

Sitzungsberichte der Preußischen Akademie
der Wissenschaften 1914–1932

Herausgegeben von

Dieter Simon

Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften



WILEY-
VCH

WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA

Herausgeber

Professor Dr. Dieter Simon,
Präsident der Berlin-Brandenburgischen
Akademie der Wissenschaften
Jägerstr. 22/23
10117 Berlin

Titelbild

Einstein hält einen Vortrag in der
Berliner Philharmonie
zugunsten notleidender Studenten (1932).
© ullstein bild

Alle Bücher von Wiley-VCH werden sorgfältig erarbeitet. Dennoch übernehmen Autoren, Herausgeber und Verlag in keinem Fall, einschließlich des vorliegenden Werkes, für die Richtigkeit von Angaben, Hinweisen und Ratschlägen sowie für eventuelle Druckfehler irgendeine Haftung.

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <<http://dnb.ddb.de>> abrufbar.

© The Hebrew University of Jerusalem, Israel
© 2006 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in andere Sprachen, vorbehalten. Kein Teil dieses Buches darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form – durch Photokopie, Mikroverfilmung oder irgendein anderes Verfahren – reproduziert oder in eine von Maschinen, insbesondere von Datenverarbeitungsmaschinen, verwendbare Sprache übertragen oder übersetzt werden. Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen, Handelsnamen oder sonstigen Kennzeichen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass diese von jedermann frei benutzt werden dürfen. Vielmehr kann es sich auch dann um eingetragene Warenzeichen oder sonstige gesetzlich geschützte Kennzeichen handeln, wenn sie nicht eigens als solche markiert sind.

Printed in the Federal Republic of Germany

Gedruckt auf säurefreiem Papier

Druck Betz-Druck GmbH, Darmstadt

Buchbinder Litges & Dopf Buchbinderei GmbH, Heppenheim

ISBN-13: 978-3-527-40609-8

ISBN-10: 3-527-40609-3

Geleitwort

Aus Anlass des Einstein-Jahres 2005 hat sich der Wiley-VCH Verlag entschlossen, im Rahmen seiner von uns herausgegebenen Reihe *Abenteuer Wissenschaftsgeschichte* diese neue Auflage von Einsteins Akademie-Vorträgen in Faksimiledruck vorzulegen und zugleich ihre Veröffentlichung im Internet zu ermöglichen. Dieser Band ergänzt somit die bereits erschienene Sammlung von Einsteins Beiträgen zu den *Annalen der Physik*, die ebenfalls als Buch mit ergänzender Website¹ erschienen ist.

Der vorliegende Band umfasst Schlüsselarbeiten Einsteins aus seinen Berliner Jahren zu Problemen der allgemeinen Relativitätstheorie und der Quantentheorie und dokumentiert Einsteins unablässige Bemühungen, durch die Formulierung einer einheitlichen Feldtheorie eine neue Grundlage der Physik zu schaffen. Diese Arbeiten werden in den *Collected Papers of Albert Einstein* ausführlich kommentiert². Da sie als Ergebnis von Einsteins Wirken an der Preußischen Akademie der Wissenschaften von 1914–1932 entstanden sind, mögen einige kurze Bemerkungen zum Verständnis dieses historischen Kontextes beitragen.

Im April 1914 folgte Albert Einstein dem Ruf der Königlich Preußischen Akademie der Wissenschaften nach Berlin. Neunzehn Jahre lang war er eines ihrer berühmtesten Mitglieder.

Im Sommer gehe ich nämlich nach Berlin als Akademie-Mensch ohne irgendwelche Verpflichtung, quasi als lebende Mumie. Ich freue mich auf diesen schwierigen Beruf [...],

schrrieb Einstein seinem Freund Jakob Laub im Herbst 1913. In seiner Berliner Zeit erlebte er den Höhepunkt seiner wissenschaftlichen und gesellschaftlichen Anerkennung. Dennoch waren diese Jahre keineswegs eine Zeit ungeteilter Freude. Sie waren nicht zuletzt von politischen und antisemitisch geprägten Angriffen auf seine Person und sein Werk gekennzeichnet und mündeten schließlich mit der Machtübernahme der Nationalsozialisten in seine erzwungene Emigration. Einstein ist nie wieder nach Berlin zurückgekehrt.

Einsteins Berufung nach Berlin war mit der Absicht verbunden, ein interdisziplinäres Forschungsprojekt ins Leben zu rufen mit dem Ziel, die Einsichten der jüngeren Physik in die Mikrostruktur der Materie und in die Wechselwirkung zwischen Materie und Strahlung für eine theoretische Begründung der Chemie fruchtbar zu machen. Einstein wurde die Akademiestelle des verstorbenen Jacobus Henricus van 't Hoff angeboten. Als hauptamtliches Mitglied der Akademie sollte er

¹ J. Renn (ed.): *Einstein's Annalen Papers – The Complete Collection 1901–1922*, Wiley-VCH 2005, ISBN 3-527-40564-X.
<http://einstein-annalen.mpiwg-berlin.mpg.de>

² *The Collected Papers of Albert Einstein*, Bde 1–9, Princeton University Press.

sich in dieser Position ausschließlich auf seine Forschungsinteressen konzentrieren können. Mit Einsteins Akademiemitgliedschaft war zudem die Berufung an die Berliner Universität verknüpft, dies mit allen akademischen Rechten, doch ohne die Pflicht, regelmäßig Vorlesungen halten zu müssen. Darüber hinaus stellte man Einstein in Aussicht, Direktor eines neu zu gründenden Kaiser-Wilhelm-Instituts für Physik zu werden.

Als Einstein nach Berlin kam, war er vor allem mit der Veränderung der Begriffe von Raum und Zeit durch die spezielle Relativitätstheorie und die Auswirkungen dieser Veränderung auf die Physik als Ganzes beschäftigt. Die klassische Theorie der Gravitation schien in einem unlösbaren Widerspruch mit diesen Begriffen zu stehen. Seine Erwartung, dass seine Arbeiten zur Lösung dieses Problems auf das Interesse seiner Akademiekollegen stoßen würden, wurde allerdings enttäuscht. Schon bei seiner Berufung wurde deutlich, dass seine revolutionären Ideen in Berlin skeptisch aufgenommen wurden. In dem von Planck, Nernst, Rubens und Warburg im Juni 1913 eingebrachten Wahlvorschlag für die Akademiemitgliedschaft wurde seine Bemühung um die Verallgemeinerung der Relativitätstheorie, ebenso wie seine Arbeit, in der er die Lichtquantenhypothese aufstellte, die zu seinem späteren Nobelpreis führte, geradezu als entschuldbarer Fehltritt eines ansonsten herausragenden jungen Forschers behandelt:

Daß er in seinen Spekulationen gelegentlich auch einmal über das Ziel hinausgeschossen haben mag, wie z.B. in seiner Hypothese der Lichtquanten, wird man ihm nicht allzuschwer anrechnen dürfen; denn ohne einmal ein Risiko zu wagen, läßt sich auch in der exakten Naturwissenschaft keine wirkliche Neuerung einführen. Gegenwärtig arbeitet er intensiv an einer neuen Gravitationstheorie; mit welchem Erfolg, kann auch erst die Zukunft lehren.

Planck machte seine Ablehnung der Arbeit an der allgemeinen Relativitätstheorie sogar zu einem zentralen Thema seiner Erwiderung auf Einsteins Antrittsrede am 2. Juli 1914; er sprach von der „Gefahr, sich gelegentlich in allzu dunkle Gebiete zu verlieren“.

Einstein wird es deshalb als einen um so größeren Triumph empfunden haben, dass er schließlich im Herbst 1915 seine allgemeine Relativitätstheorie zum erfolgreichen Abschluss bringen konnte. Im Wochentakt legte er seinen skeptischen Akademiekollegen insgesamt die vier Berichte vor, in denen er sich Schritt für Schritt den korrekten Feldgleichungen der Gravitation näherte – im Wettlauf mit dem Mathematiker David Hilbert, der zwar weniger von der Physik aber weitaus mehr von den mathematischen Techniken verstand, die zur Lösung dieses Problems erforderlich waren.

Nicht nur der erfolgreiche Abschluss der allgemeinen Relativitätstheorie dokumentierte im übrigen, dass sich Einstein keineswegs durch das Verhalten seiner Berliner Kollegen beirren ließ, wenn sie ihm die erbetene wissenschaftliche Unterstützung versagten. Bereits vor der Vollendung der allgemeinen Relativitätstheorie hatte er sich um die Unterstützung der Astronomen bei dem Versuch bemüht, die Konsequenzen seiner Theorie empirisch zu überprüfen.

Offenbar auch in der Hoffnung, das Interesse der Astronomen zu wecken, kommentierte Einstein als einzige seiner vier abschließenden Arbeiten zur allgemeinen Relativitätstheorie seine Berechnung der Perihelverschiebung des Merkurs mündlich vor der Akademie – die anderen wurden lediglich schriftlich vorgelegt und in den Sitzungsberichten publiziert.

Einsteins Distanz zur Akademie ist möglicherweise darauf zurückzuführen, dass er auf seine eigenen ehrgeizigen Bemühungen bezog, was tatsächlich nur der ihm ungewohnte Arbeits- und Umgangsstil der Berliner Akademie war, dem akademischen Kontext mehr Aufmerksamkeit zu schenken als den wissenschaftlichen Inhalten.

Einstein nahm jedoch die Distanz seiner Kollegen zu den ihn so brennend interessierenden Problemen ebenso wie die ihm fremden Umgangsformen in der Akademie relativ gelassen hin. Für ihn war die Akademie, wie er an Otto Stern schrieb, „amüsant, eigentlich mehr ulkig als ernst“. Sogar sich selbst bezog er in seine ironische Skepsis gegenüber der Akademie ein, wie aus einem Brief an seinen Freund Heinrich Zangger vom Winter 1917/18 deutlich wird:

Der Geist wird lahm, die Kraft schwindet aber das Renomme hängt glitzernd um die verkalkte Schale. [...] Ich bin gerade recht für die Akademie, deren Quintessenz mehr in der blossen Existenz als im Wirken liegt.

Einstein konfrontierte seine Berliner Akademiekollegen noch mit einer weiteren Herausforderung, der politischen Brisanz, die sich mit seinem Namen und mit seiner Theorie verband. In den Konflikten um seine Person kam ein neues Verhältnis zwischen Wissenschaft und Politik zum Ausdruck, das in bestimmten Situationen dazu führte, dass Wissenschaftler, ob sie wollten oder nicht, politische Positionen einnahmen. Die politische Distanz zwischen Einstein und seinen Akademiekollegen setzte schon kurz nach seinem Antritt der Stelle in Berlin ein. Als im August 1914 der Krieg ausbrach, ließ sich Einstein nicht von der allgemeinen Kriegshysterie mitreißen. Die meisten seiner Kollegen dagegen – auch die Mitglieder der Akademie – taten wie selbstverständlich dasjenige, von dem sie meinten, dass es von ihnen erwartet wurde. Die Kompartimentalisierung des Wissens in der Akademie, die die fortgeschrittene Spezialisierung der Wissenschaft im 19. Jahrhundert widerspiegelte, und die vermeintliche Trennung von Wissenschaft und Politik, setzten die Akademie außerstande, auf politische Herausforderungen zu reagieren. Einsteins pazifistische und internationalistische Haltung isolierte ihn damit zwangsläufig von seinen Akademiekollegen.

Als Einstein im März 1933 öffentlich gegen den Antisemitismus auftrat, wurde er für die Akademie untragbar, obwohl seine Erklärung eher moderat wirkt und auf die Vorfälle in Deutschland nur mit einem einzigen Satz eingeht:

Die Akte brutaler Gewalt und Bedrückung, die gerichtet sind gegen alle Leute freien Geistes und gegen die Juden, diese Akte, die in Deutschland stattgefunden haben und noch stattfinden, haben glücklicherweise das Gewissen aller Länder aufgerüttelt, die dem Humanitätsgedanken und den politischen Freiheiten treu bleiben.

Kurz nachdem er diese Erklärung verfasst hatte, trat er aus der Akademie aus und fasste den Entschluss, nicht mehr nach Deutschland zurückzukehren. Obwohl mit Einsteins Entscheidung die unüberbrückbare Kluft zwischen ihm und seinen Akademiekollegen klar war, ist ihm der Entschluss, Berlin endgültig den Rücken zu kehren, offenbar dennoch keineswegs leicht gefallen. In seinem Rücktrittsschreiben an die Akademie stellte er fest:

Die Akademie hat mir 19 Jahre die Möglichkeit gegeben, mich frei von jeder beruflichen Verpflichtung wissenschaftlicher Arbeit zu widmen. [...] Ungern scheidet ich aus ihrem Kreis auch der Anregungen und der schönen menschlichen Beziehungen wegen, die ich während dieser langen Zeit als ihr Mitglied genoss und stets hoch schätzte.

Das Plenum der Akademie reagierte auf den Austritt Einsteins mit einer beschämenden Presseerklärung. Einsteins Ausscheiden aus der Akademie wurde im Übrigen zum Auftakt einer beispiellosen Vertreibung und Verfolgung von Wissenschaftlern und Künstlern aus Deutschland. Dass nicht wenige, die weder die Mittel noch den Mut zur Emigration fanden, in den nationalsozialistischen Vernichtungslagern umgebracht wurden, gehört zu den grausamen Konsequenzen der Entrechtung und Verfolgung jüdischer Bürger im nationalsozialistischen Deutschland, die Einstein zur Emigration veranlassten.

Zugleich wurde damit eine fast einmalig zu nennende schöpferische Atmosphäre, die Deutschland und speziell Berlin in den ersten Jahrzehnten des 20. Jahrhunderts zu einem wissenschaftlichen Weltzentrum gemacht hatte, für das Einsteins Berliner Wirkungszeit ein Symbol war, zerstört. Erhalten geblieben sind uns dagegen die Werke, die damals entstanden sind. Einsteins Akademie-Vorträge gehören zum unvergänglichen Erbe dieser Epoche und bieten noch heute zahlreiche Anknüpfungspunkte für die Fortsetzung jener Suche nach einer Einheit der Natur, in der Einstein sich auch durch die Schrecken seiner Zeit nicht beirren ließ.

Jürgen Renn

Berlin, im September 2005

Professor Dr. Jürgen Renn ist Direktor am Max-Planck-Institut für Wissenschaftsgeschichte. Im ‚World Year of Physics‘ zeichnete er für die Initiierung und Durchführung der Ausstellung ‚Albert Einstein – Ingenieur des Universums‘ in Berlin verantwortlich. Dieses Geleitwort beruht auf folgendem Artikel: ‚Albert Einstein: Alte und neue Kontexte in Berlin‘. In *Die Königlich Preußische Akademie der Wissenschaften zu Berlin im Kaiserreich*, Hrsg. J. Kocka, Berlin, Akademie Verlag, 1999.

Vorwort

Dieser Band enthält in photomechanischem Wiederabdruck 47 der von Albert Einstein zwischen 1914 und 1932 in den Sitzungen der Preußischen Akademie gehaltenen Vorträge, die der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften als Sonderdruck aus den seinerzeitigen Sitzungsberichten der Akademie vorliegen.

Einsteins Akademieabhandlungen enthalten die ersten grundlegenden Mitteilungen über die allgemeine Relativitätstheorie und ihre Folgerungen, einschließlich der Vorhersage von Gravitationswellen, seine Begründung der relativistischen Kosmologie und die Fundamente der Quantenstatistik. Wegweisend für die heutige Physik, wenn auch verfrüht, waren Einsteins zahlreiche Mitteilungen über Versuche, eine einheitliche, geometrisch begründete Feldtheorie zu schaffen und damit eine neue Beziehung zwischen Physik und Mathematik herzustellen. Andere Akademiemitteilungen Einsteins zeigen ihn als ingeniösen Experimentator und als Anreger von Grundversuchen der Physik.

Mitten in die heutigen Hauptprobleme der physikalischen Forschung führen Einsteins Diskussionen zu den Grundfragen der Quantenmechanik und der Beziehungen von Materie- und Raumzeitstruktur, von Elementarteilchen und Feldphysik.

Die Akademieschriften Einsteins bestimmten im ersten Drittel des 20. Jahrhunderts weitgehend die Physik und beeinflussten sie wesentlich bis jetzt. Sie gehören zu den großartigsten Dokumenten physikalischen Denkens und Forschens.

Diese Seite wurde absichtlich leer gelassen

Inhalt

1. Antrittsrede und Erwiderung von Max Planck am Leibniztag (1914, SB II, S. 739–744)*	1
2. Die formale Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie (1914, SB II, S. 1030–1085)	8
3. Zur allgemeinen Relativitätstheorie. (Mit Nachtrag) (1915, SB II, S. 778–786 und S. 799–801)	65
4. Erklärung der Perihelbewegung des Merkur aus der allgemeinen Relativitätstheorie (1915, SB II, S. 831–839)	78
5. Die Feldgleichungen der Gravitation (1915, SB II, S. 844–847)	88
6. Eine neue formale Deutung der Maxwellschen Feldgleichungen der Elektrodynamik (1916, SB I, S. 184–188)	93
7. Näherungsweise Integration der Feldgleichungen der Gravitation (1916, SB I, S. 688–696)	99
8. Gedächtnisrede auf Karl Schwarzschild (1916, SB I, S. 768–770)	109
9. Hamiltonsches Prinzip und allgemeine Relativitätstheorie (1916, SB II, S. 1111–1116)	112
10. Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie (1917, SB I, S. 142–152)	119

* Sitzungsberichte der Königlich Preußischen Akademie der Wissenschaften,
1914–1918: jeweils Halbband 1 = SB I, Halbband 2 = SB II.
Sitzungsberichte der Preußischen Akademie der Wissenschaften, 1919–1921:
1919 und 1921 jeweils Halbband 1 = SB I, Halbband 2 = SB II,
1920 in einem Band = SB.
Sitzungsberichte der Preußischen Akademie der Wissenschaften. Physikalisch-
mathematische Klasse, 1922–1932: SB Phys.-math.

11. Eine Ableitung des Theorems von Jacobi (1917, SB II, S. 606–608)	131
12. Über Gravitationswellen (1918, SB I, S. 154–167)	135
13. Kritisches zu einer von Hrn. De Sitter gegebenen Lösung der Gravitationsgleichungen (1918, SB I, S. 270–272)	150
14. Der Energiesatz in der allgemeinen Relativitätstheorie (1918, SB I, S. 448–459)	154
15. Spielen Gravitationsfelder im Aufbau der materiellen Elementarteilchen eine wesentliche Rolle? (1919, SB I, S. 349–356)	167
16. Bemerkungen über periodische Schwankungen der Mondlänge, welche bisher nach der Newtonschen Mechanik nicht erklärbar erschieden (1919, SB I, S. 433–436)	176
17. Schallausbreitung in teilweise dissoziierten Gasen (1920, SB, S. 380–385)	181
18. Geometrie und Erfahrung (1921, SB I, S. 123–130)	188
19. Über eine naheliegende Ergänzung des Fundamentes der allgemeinen Relativitätstheorie (1921, SB I, S. 261–264)	197
20. Über ein den Elementarprozeß der Lichtemission betreffendes Experiment (1921, SB II, S. 882–883)	202
21. Zur Theorie der Lichtfortpflanzung in dispergierenden Medien (1922, SB Phys.-math., S. 18–22)	205
22. Bemerkung zu der Abhandlung von E. Trefftz: „Das statische Gravitationsfeld zweier Massenpunkte in der Einsteinschen Theorie“ (1922, SB Phys.-math., S. 448–449)	211
23. Zur allgemeinen Relativitätstheorie (1923, SB Phys.-math., S. 32–38)	214

24. Bemerkung zu meiner Arbeit „Zur allgemeinen Relativitätstheorie“ (1923, SB Phys.-math., S. 76–77)	222
25. Zur affinen Feldtheorie (1923, SB Phys.-math., S. 137–140)	225
26. Bietet die Feldtheorie Möglichkeiten für die Lösung des Quantenproblems? (1923, SB Phys.-math., S. 359–364)	230
27. Quantentheorie des einatomigen idealen Gases. Erste Abhandlung (1924, SB Phys.-math., S. 261–267)	237
28. Quantentheorie des einatomigen idealen Gases. Zweite Abhandlung (1925, SB Phys.-math., S. 3–14)	245
29. Zur Quantentheorie des idealen Gases (1925, SB Phys.-math., S. 18–25)	258
30. Einheitliche Feldtheorie von Gravitation und Elektrizität (1925, SB Phys.-math., S. 414–419)	267
31. Über die Interferenzeigenschaften des durch Kanalstrahlen emittierten Lichtes (1926, SB Phys.-math., S. 334–340)	274
32. A. Einstein und J. Grommer: Allgemeine Relativitätstheorie und Bewegungsgesetz (1927, SB Phys.-math., S. 2–13)	282
33. Zu Kaluzas Theorie des Zusammenhanges von Gravitation und Elektrizität. Erste Mitteilung (1927, SB Phys.-math., S. 23–25)	295
34. Zu Kaluzas Theorie des Zusammenhanges von Gravitation und Elektrizität. Zweite Mitteilung (1927, SB Phys.-math., S. 26–30)	299
35. Allgemeine Relativitätstheorie und Bewegungsgesetz (1927, SB Phys.-math., S. 235–245)	304
36. Riemann-Geometrie mit Aufrechterhaltung des Begriffes des Fernparallelismus (1928, SB Phys.-math., S. 217–221)	316

37. Neue Möglichkeit für eine einheitliche Feldtheorie von Gravitation und Elektrizität (1928, SB Phys.-math., S. 224–227)	322
38. Zur einheitlichen Feldtheorie (1929, SB Phys.-math., S. 2–7)	327
39. Einheitliche Feldtheorie und Hamiltonsches Prinzip (1929, SB Phys.-math., S. 156–159)	334
40. Die Kompatibilität der Feldgleichungen in der einheitlichen Feldtheorie (1930, SB Phys.-math., S. 18–23)	339
41. A. Einstein und W. Mayer: Zwei strenge statische Lösungen der Feldgleichungen der einheitlichen Feldtheorie (1930, SB Phys.-math., S. 110–120)	346
42. Zur Theorie der Räume mit Riemann-Metrik und Fernparallelismus (1930, SB Phys.-math., S. 401–402)	358
43. Zum kosmologischen Problem der allgemeinen Relativitätstheorie (1931, SB Phys.-math., S. 235–237)	361
44. A. Einstein und W. Mayer: Systematische Untersuchung über kompatible Feldgleichungen, welche in einem Riemannschen Raume mit Fernparallelismus gesetzt werden können (1931, SB Phys.-math., S. 257–265)	365
45. A. Einstein und W. Mayer: Einheitliche Theorie von Gravitation und Elektrizität. Erste Abhandlung (1931, SB Phys.-math., S. 541–557)	375
46. A. Einstein und W. Mayer: Einheitliche Theorie von Gravitation und Elektrizität. Zweite Abhandlung (1932, SB Phys.-math., S. 130–137)	393
47. A. Einstein und W. Mayer: Semi-Vektoren und Spinoren (1932, SB Phys.-math., S. 522–550)	402

Folgende Titel und Bemerkungen A. Einsteins in den Sitzungsberichten sind nicht in das Gesamtregister (Gesamtregister der Abhandlungen, Sitzungsberichte, Jahrbücher, Vorträge und Schriften der Preußischen Akademie der Wissenschaften 1900–1945, Akademie-Verlag, Berlin 1966) aufgenommen worden und sind nicht in diesem Band enthalten:

- A. Kommentare von A. Einstein zu Arbeiten anderer Akademiemitglieder in den Sitzungsberichten:
 - a) Kommentar zu H. Weyl, Gravitation und Elektrizität (1918, SB I, S. 478)
 - b) Kommentar zu A. v. Brunn, Zu Hrn. Einsteins Bemerkung über die unregelmäßigen Schwankungen der Mondlänge von der genäherten Periode des Umlaufes der Mondknoten (1919, SB II, S. 711)

- B. Nur mit Titel und Inhaltsangabe sind folgende Arbeiten von A. Einstein in die Sitzungsberichte aufgenommen worden:
 - a) Über die Grundgedanken der Allgemeinen Relativitätstheorie und Anwendung dieser Theorie in der Astronomie (1915, SB I, S. 315)
 - b) Über einige anschauliche Überlegungen aus dem Gebiete der Relativitätstheorie (1916, SB I, S. 423)
 - c) Über eine von Levi-Civita und Weyl gefundene Vereinfachung der Riemannschen Theorie der Krümmung und über die hieran sich knüpfende Weylsche Theorie der Gravitation und Elektrizität (1918, SB I, S. 615)
 - d) Über eine Veranschaulichung der Verhältnisse im sphärischen Raum, ferner über die Feldgleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie vom Standpunkte des kosmologischen Problems und des Problems der Konstitution der Materie (1919, SB I, S. 463)
 - e) Das Trägheitsmoment des Wasserstoff-Moleküls (1920, SB, S. 65)
 - f) Experiment betreffend die Gültigkeitsgrenze der Undulationstheorie (1922, SB Phys.-math., S. 2)
 - g) Über den gegenwärtigen Zustand des Strahlungsproblems (1924, SB Phys.-math., S. 179)
 - h) 1. Über die Ursache des „Mäander“-Phänomens bei Flußläufen (Beeinflussung des mittleren Geschwindigkeitsgefälles am Ufer durch eine von der örtlich verschiedenen Zentrifugalkraft verursachten Zirkulation);
2. Über die Anwendung einer von Rainich gefundenen Spaltung des Riemannschen Krümmungstensors in der Theorie des Gravitationsfeldes (1926, SB Phys.-math., S. 1)
 - i) Einheitliche Interpretation von Gravitation und Elektrizität (1929, SB Phys.-math., S. 102)
 - j) Über die Fortschritte der einheitlichen Feldtheorie (1930, SB Phys.-math., S. 143)
 - k) Über die statistischen Eigenschaften der Strahlung (1930, SB Phys.-math., S. 543)

Die Publikation der Einsteinschen Texte erfolgt mit freundlicher Zustimmung des Albert Einstein Archivs der Hebräischen Universität Jerusalem.

Diese Seite wurde absichtlich leer gelassen

SITZUNGSBERICHTE 1914.
XXVIII.

DER

KÖNIGLICH PREUSSISCHEN

AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN.

Öffentliche Sitzung zur Feier des LEIBNIZISCHEN Jahrestages vom
2. Juli.

Antrittsrede

des Hrn. EINSTEIN

und Erwiderung

des Hrn. PLANCK,
Sekretars der phys.-math. Klasse.

[739, 740]

Antrittsrede des Hrn. EINSTEIN.

Hochgeehrte Kollegen!

Nehmen Sie zuerst meinen tiefgefühlten Dank dafür entgegen, daß Sie mir die größte Wohltat erwiesen haben, die einem Menschen meiner Art erwiesen werden kann. Sie haben es mir durch die Berufung an Ihre Akademie ermöglicht, mich frei von den Aufregungen und Sorgen eines praktischen Berufes ganz den wissenschaftlichen Studien zu widmen. Ich bitte Sie, von meinem Gefühl der Dankbarkeit und von der Emsigkeit meines Strebens auch dann überzeugt zu sein, wenn Ihnen die Früchte meiner Bemühungen als ärmliche erscheinen werden.

Gestatten Sie mir im Anschluß hieran einige allgemeine Bemerkungen über die Stellung, welche mein Arbeitsgebiet, die theoretische Physik, der experimentellen Physik gegenüber einnimmt. Ein befreundeter Mathematiker sagte mir neulich halb scherzhaft: »Der Mathematiker kann schon etwas, aber freilich gerade dasjenige nicht, was man jeweilen von ihm haben will.« Ganz ähnlich verhält es sich oft mit dem theoretischen Physiker, der vom Experimentalphysiker zu Rate gezogen wird. Woher rührt dieser eigentümliche Mangel an Anpassungsfähigkeit?

Die Methode des Theoretikers bringt es mit sich, daß er als Fundament allgemeine Voraussetzungen, sogenannte Prinzipie, benutzt, aus denen er Folgerungen deduzieren kann. Seine Tätigkeit zerfällt also in zwei Teile. Er hat erstens jene Prinzipie aufzusuchen, zweitens die aus den Prinzipien fließenden Folgerungen zu entwickeln. Für die Erfüllung der zweiten der genannten Aufgaben erhält er auf der Schule ein treffliches Rüstzeug. Wenn also die erste seiner Aufgaben auf einem Gebiete bzw. für einen Komplex von Zusammenhängen bereits gelöst ist, wird ihm bei hinreichendem Fleiß und Verstand der Erfolg nicht fehlen. Die erste der genannten Aufgaben, nämlich jene, die Prinzipie aufzustellen, welche der Deduktion als Basis dienen sollen, ist von ganz anderer Art. Hier gibt es keine erlernbare, systematisch anwendbare Methode, die zum Ziele führt. Der Forscher muß vielmehr der Natur jene allgemeinen Prinzipie gleichsam ablauschen,

indem er an größeren Komplexen von Erfahrungstatsachen gewisse allgemeine Züge erschaut, die sich scharf formulieren lassen.

Ist diese Formulierung einmal gelungen, so setzt eine Entwicklung der Folgerungen ein, die oft ungeahnte Zusammenhänge liefert, die über das Tatsachengebiet, an dem die Prinzipie gewonnen sind, weit hinausreichen. Solange aber die Prinzipie, die der Deduktion als Basis dienen können, nicht gefunden sind, nützt dem Theoretiker die einzelne Erfahrungstatsache zunächst nichts; ja er vermag dann nicht einmal mit einzelnen empirisch ermittelten allgemeineren Gesetzmäßigkeiten etwas anzufangen. Er muß vielmehr im Zustande der Hilflosigkeit den Einzelresultaten der empirischen Forschung gegenüber verharren, bis sich ihm Prinzipie erschlossen haben, die er zur Basis deduktiver Entwicklungen machen kann.

In einer derartigen Lage befindet sich die Theorie gegenwärtig gegenüber den Gesetzen der Wärmestrahlung und Molekularbewegung bei tiefen Temperaturen. Vor etwa fünfzehn Jahren zweifelte man noch nicht daran, daß auf der Grundlage der auf die Molekülbewegungen angewendeten GALILEI-NEWTONSchen Mechanik und der MAXWELLSchen Theorie des elektromagnetischen Feldes eine richtige Darstellung der elektrischen, optischen und thermischen Eigenschaften der Körper möglich sei. Da zeigte PLANCK, daß man zur Aufstellung eines mit der Erfahrung übereinstimmenden Gesetzes der Wärmestrahlung sich einer Methode des Rechnens bedienen muß, deren Unvereinbarkeit mit den Prinzipien der klassischen Mechanik immer deutlicher wurde. Mit dieser Rechenmethode führte PLANCK nämlich die sogenannte Quantenhypothese in die Physik ein, die seitdem glänzende Bestätigungen erfahren hat. Mit dieser Quantenhypothese stürzte er die klassische Mechanik für den Fall, daß genügend kleine Massen mit hinreichend kleinen Geschwindigkeiten und genügend großen Beschleunigungen bewegt sind, so daß wir heute die von GALILEI und NEWTON aufgestellten Bewegungsgesetze nur mehr als Grenzgesetze gelten lassen können. Aber trotz emsigster Bemühungen der Theoretiker gelang es bisher nicht, die Prinzipie der Mechanik durch solche zu ersetzen, welche PLANCKS Gesetz der Wärmestrahlung bzw. der Quantenhypothese entsprechen. So unzweifelhaft auch erwiesen ist, daß wir die Wärme auf Molekularbewegung zurückzuführen haben, müssen wir heute doch gestehen, daß wir den Grundgesetzen dieser Bewegung ähnlich gegenüberstehen wie die Astronomen vor NEWTON den Bewegungen der Planeten.

Ich habe soeben auf einen Tatsachenkomplex hingewiesen, für dessen theoretische Behandlung die Prinzipie fehlen. Es kann aber ebensogut der Fall eintreten, daß klar formulierte Prinzipie zu Kon-

[741, 742]

Antrittsrede und Erwiderung.

3

sequenzen führen, die ganz oder fast ganz aus dem Rahmen des gegenwärtig unserer Erfahrung zugänglichen Tatsachenbereiches herausfallen. In diesem Falle kann es langwieriger empirischer Forschungsarbeit bedürfen, um zu erfahren, ob die Prinzipie der Theorie der Wirklichkeit entsprechen. Dieser Fall bietet sich uns dar bei der Relativitätstheorie.

Eine Analyse der zeitlichen und räumlichen Grundbegriffe hat uns gezeigt, daß der aus der Optik bewegter Körper sich ergebende Satz von der Konstanz der Vakuumlichtgeschwindigkeit uns keineswegs zu der Theorie eines ruhenden Lichtäthers zwingt. Es ließ sich vielmehr eine allgemeine Theorie aufstellen, die dem Umstande Rechnung trägt, daß wir von der Translationsbewegung der Erde bei auf der Erde ausgeführten Versuchen niemals etwas merken. Dabei wird von dem Relativitätsprinzip Gebrauch gemacht, welches lautet: die Naturgesetze ändern ihre Form nicht, wenn man von dem ursprünglichen (berechtigten) Koordinatensystem zu einem neuen, relativ zu ihm in gleichförmiger Translationsbewegung begriffenen übergeht. Diese Theorie hat nennenswerte Bestätigungen durch die Erfahrung erhalten und hat zu einer Vereinfachung der theoretischen Darstellung bereits in Zusammenhang gebrachter Tatsachenkomplexe geführt.

Andererseits aber gewährt diese Theorie vom theoretischen Gesichtspunkte aus nicht die volle Befriedigung, weil das vorhin formulierte Relativitätsprinzip die gleichförmige Bewegung bevorzugt. Wenn es nämlich wahr ist, daß der gleichförmigen Bewegung vom physikalischen Standpunkte aus eine absolute Bedeutung nicht zugeschrieben werden darf, so liegt die Frage auf der Hand, ob diese Aussage nicht auch auf ungleichförmige Bewegungen auszudehnen sei. Es zeigte sich, daß man zu einer ganz bestimmten Erweiterung der Relativitätstheorie gelangt, wenn man ein Relativitätsprinzip in diesem erweiterten Sinne zugrunde legt. Man wird dabei zu einer allgemeinen, die Dynamik einschließenden Theorie der Gravitation geführt. Es fehlt aber vorläufig das Tatsachenmaterial, an dem wir die Berechtigung der Einführung des zugrunde gelegten Prinzips prüfen könnten.

Wir haben festgestellt, daß die induktive Physik an die deduktive und die deduktive an die induktive Fragen stellt, deren Beantwortung die Anspannung aller Kräfte erfordert. Möge es bald gelingen, durch vereinte Arbeit zu endgültigen Fortschritten vorzudringen!

Erwiderung des Sekretars Hrn. PLANCK.

Sie haben, Hr. Kollege EINSTEIN, durch Ihre Antrittsworte mir die Aufgabe wesentlich erleichtert, eine Begründung dafür zu geben, daß die Akademie das Zusammentreffen mehrerer außerordentlich glücklicher und außerordentlich dankenswerter Umstände gern benutzt hat, um Sie in ihren Kreis zu ziehen. Denn ich habe dem von Ihnen Gesagten nur noch das eine ergänzend hinzuzufügen, daß Sie, wie Ihre Arbeiten gezeigt haben, das Programm des theoretischen Physikers nicht bloß zu formulieren, sondern auch durchzuführen verstehen. Beide Seiten der von Ihnen geschilderten Tätigkeit, die schöpferische sowohl wie die deduktive, sind für den Fortschritt der Wissenschaft notwendig, beide müssen sich, auch in dem einzelnen Forscher, ergänzen, beiden ist auch die Wirksamkeit unserer Akademie gewidmet, und zwar nicht nur in der Physik, sondern, mehr oder weniger ausgesprochen, in jeder der durch sie vertretenen Wissenschaften.

Aber trotz dieser gleichmäßigen Unentbehrlichkeit der beiden Arbeitsmethoden ist es doch nur menschlich und natürlich, daß den Einzelnen Begabung und Neigung zur Bevorzugung der einen vor der anderen führen, und wenn Sie sich über diesen Punkt auch nicht ausdrücklich verbreitet haben, so kenne ich Sie doch gut genug, um die Behauptung wagen zu dürfen, daß Ihre eigentliche Liebe derjenigen Arbeitsrichtung gehört, in welcher die Persönlichkeit sich am freiesten entfaltet, in der die Einbildungskraft ihr reichstes Spiel treibt und der Forscher sich am ersten dem behaglichen Gefühl hingeben kann, daß er nicht so leicht durch einen anderen zu ersetzen ist. Freilich droht ihm dabei auch am ehesten die Gefahr, sich gelegentlich in allzu dunkle Gebiete zu verlieren und plötzlich unversehens auf harten Widerspruch zu stoßen, sei es von seiten der Theoretiker oder, was schlimmer ist, von seiten der Experimentatoren. Aber gerade in solchem Kampf wird die Wissenschaft am besten gefördert, und man darf für diese Art von Kräften gewiß das SCHILLERSche Wort variieren: »Großes wirkt ihr Bund, Größeres wirkt ihr Streit.«

So werden Sie es mir auch heute sicherlich nicht verargen, wenn ich, im vollen Bewußtsein des vielen, was uns eint, einen Augenblick bei solchen Punkten verweile, in welchen unsere Ansichten sich trennen. Zwar will ich nicht mit Ihnen rechten über die Art des

[743, 744]

Antrittsrede und Erwiderung.

5

Unterschieds, den Sie machen zwischen einer Rechenmethode und einem Prinzip, insbesondere darüber, wie es möglich ist, daß ein Prinzip durch eine Rechenmethode gestürzt werden kann; denn es würde sich da schließlich doch nur um Worte handeln, da wir uns sachlich ganz gewiß ohne weiteres restlos verständigen würden.

Aber in einem anderen, wichtigeren Punkte kann ich doch der Versuchung nicht widerstehen, meinen Einspruch anzumelden. Wenn Sie das Prinzip der Relativität in der zuerst von Ihnen formulierten Fassung aus dem Grunde nicht voll befriedigend nennen, weil es unter den verschiedenen Arten von Bewegungen die gleichförmige Bewegung bevorzugt, so könnte man, wie ich meine, ebensogut auch umgekehrter Ansicht sein und gerade in der Bevorzugung der gleichförmigen Bewegung ein besonders wichtiges und wertvolles Merkmal der Theorie, in der Durchführung dieser Auffassung einen besonderen Fortschritt der Wissenschaft erblicken. Denn die Naturgesetze, nach denen wir suchen, stellen doch stets gewisse Beschränkungen dar, nämlich eine gewisse spezielle Auswahl aus dem unendlich mannigfaltigen Bereich der überhaupt denkbaren logisch widerspruchsfreien Beziehungen.

Oder wollen wir etwa das NEWTONSche Attraktionsgesetz deshalb unbefriedigend finden, weil darin gerade die Potenz 2 eine bevorzugte Rolle spielt? Wir sehen doch vielmehr in diesem Umstand eine natürliche Folge der Dreidimensionalität unseres Raumes, die wir als eine gegebene Tatsache hinnehmen, ohne uns, als vernünftige Physiker, weiter darüber zu beunruhigen, warum der Raum nicht vier oder noch mehr Dimensionen besitzt. Ähnlich könnten wir vielleicht die Bevorzugung der gleichförmigen Bewegung in engen Zusammenhang bringen mit dem besonderen Vorrecht, welches die gerade Linie unter allen räumlichen Linien nun einmal tatsächlich auszeichnet.

Es kommt hinzu, daß auch in Ihrem verallgemeinerten Relativitätsprinzip die Bedingung für die Berechtigung eines Koordinatensystems nur weiter gefaßt, nicht aber ganz aufgehoben wird; denn daß nicht alle beliebigen Koordinatensysteme berechtigt sein können, haben Sie selber erst kürzlich bewiesen. Eine Grenze für die Berechtigung muß also in jedem Falle konstatiert werden; es fragt sich nur, ob dieselbe enger oder weiter zu ziehen ist.

Doch bei alledem: Sie wissen so gut wie ich, verehrter Hr. Kollege, daß es sich bei diesen Meinungsverschiedenheiten nicht um Gegensätze der Erkenntnis, sondern um Gegensätze der Erwartung handelt, mit der wir der Beantwortung einer an die Natur gestellten Frage entgegensehen. Und nicht darin, wie die Antwort ausfallen wird, sondern darin, daß überhaupt eine vollständige Beantwortung, früher oder später, in sicherer Aussicht steht, liegt die hohe, niemals anfecht-

6

Öffentliche Sitzung vom 2. Juli 1914.

[744]

bare Bedeutung der von Ihnen entwickelten Theorie begründet. Hoffen wir, daß schon die am 21. August d. J. bevorstehende Sonnenfinsternis, an deren Erforschung sich auch unsere Akademie durch Bewilligung besonderer Mittel beteiligt hat, die nach dieser Richtung in sie gesetzten Erwartungen rechtfertigt. Wie dann auch das Ergebnis sein wird, in jedem Falle stehen wir vor einer wertvollen Bereicherung unserer Wissenschaft, in welcher sich, wie wir nicht ohne einen gewissen Stolz sagen dürfen, leichter als in anderen Wissenschaften die schärfsten sachlichen Gegensätze in persönlicher Hochschätzung und in herzlich freundschaftlicher Gesinnung austragen lassen. Daß dies sich auch im vorliegenden Falle bewahrheiten wird, das lassen Sie mich zum Schluß nicht nur als frommen Wunsch, sondern als erfreuliche, aus vielfacher Erfahrung geschöpfte Gewißheit aussprechen!

Ausgegeben am 9. Juli.

SITZUNGSBERICHTE

1914.
XLI.

DER

KÖNIGLICH PREUSSISCHEN

AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN.

Gesamtsitzung vom 19. November.

Mitth. aus der Sitzung der phys.-math. Classe vom 29. October.

**Die formale Grundlage der allgemeinen
Relativitätstheorie.**

VON A. EINSTEIN.

Die formale Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie.

VON A. EINSTEIN.

In den letzten Jahren habe ich, zum Teil zusammen mit meinem Freunde GROSSMANN, eine Verallgemeinerung der Relativitätstheorie ausgearbeitet. Als heuristische Hilfsmittel sind bei jenen Untersuchungen in bunter Mischung physikalische und mathematische Forderungen verwendet, so daß es nicht leicht ist, an Hand jener Arbeiten die Theorie vom formal mathematischen Standpunkte aus zu übersehen und zu charakterisieren. Diese Lücke habe ich durch die vorliegende Arbeit in erster Linie ausfüllen wollen. Es gelang insbesondere, die Gleichungen des Gravitationsfeldes auf einem rein kovariantentheoretischen Wege zu gewinnen (Abteilung D). Auch suchte ich einfache Ableitungen für die Grundgesetze des absoluten Differentialkalküls zu geben, die zum Teil neu sein dürften (Abteilung B), um dem Leser ein vollständiges Erfassen der Theorie ohne die Lektüre anderer, rein mathematischer Abhandlungen zu ermöglichen. Um die mathematischen Methoden zu illustrieren, habe ich die (EULERSCHEN) Gleichungen der Hydrodynamik und die Feldgleichungen der Elektrodynamik bewegter Körper abgeleitet (Abteilung C). Im Abschnitt E ist gezeigt, daß NEWTONS Gravitationstheorie sich aus der allgemeinen Theorie als Näherung ergibt; auch sind dort die elementarsten, für die vorliegende Theorie, charakteristischen Eigenschaften des NEWTONSCHEN (statischen) Gravitationsfeldes (Lichtstrahlenkrümmung, Verschiebung der Spektrallinien) abgeleitet.

A. Grundgedanke der Theorie.

§ 1. Einleitende Überlegungen.

Der ursprünglichen Relativitätstheorie liegt die Voraussetzung zugrunde, daß für die Beschreibung der Naturgesetze alle Koordinatensysteme gleichberechtigt seien, die relativ zueinander in gleichförmiger Translationsbewegung sind. Vom Standpunkte der Erfahrung aus, er-

1031 Gesamtsitzung v. 19. Nov. 1914. — Mitth. d. phys.-math. Cl. v. 29. Oct.

hält diese Theorie ihre Hauptstütze in der Tatsache, daß wir beim Experimentieren auf der Erde absolut nichts davon merken, daß die Erde sich mit erheblicher Geschwindigkeit um die Sonne bewegt.

Aber das Vertrauen, welches wir der Relativitätstheorie entgegenbringen, hat noch eine andere Wurzel. Man verschließt sich nämlich nicht leicht folgender Erwägung. Wenn K und K' zwei relativ zueinander in gleichförmiger Translationsbewegung befindliche Koordinatensysteme sind, so sind diese Systeme vom kinematischen Standpunkt aus vollkommen gleichwertig. Wir suchen deshalb vergeblich nach einem zureichenden Grunde dafür, warum eins dieser Systeme geeigneter sein sollte, bei der Formulierung der Naturgesetze als Bezugssystem zu dienen, als das andere; wir fühlen uns vielmehr dazu gedrängt, die Gleichberechtigung beider Systeme zu postulieren.

Dies Argument fordert aber sofort ein Gegenargument heraus. Die kinematische Gleichberechtigung zweier Koordinatensysteme ist nämlich durchaus nicht auf den Fall beschränkt, daß die beiden ins Auge gefaßten Koordinatensysteme K und K' sich in gleichförmiger Translationsbewegung gegeneinander befinden. Diese Gleichberechtigung vom kinematischen Standpunkt aus besteht z. B. ebenso gut, wenn die Systeme relativ zueinander gleichförmig rotieren. Man fühlt sich daher zu der Annahme gedrängt, daß die bisherige Relativitätstheorie in weitgehendem Maße zu verallgemeinern sei, derart, daß die ungerecht scheinende Bevorzugung der gleichförmigen Translation gegenüber Relativbewegungen anderer Art aus der Theorie verschwindet. Dies Bedürfnis nach einer derartigen Erweiterung der Theorie muß jeder empfinden, der sich eingehend mit dem Gegenstande befaßt hat.

Zunächst scheint es nun allerdings, daß eine derartige Erweiterung der Relativitätstheorie aus physikalischen Gründen abzulehnen sei. Es sei nämlich K ein im GALILEI-NEWTONSchen Sinne berechtigtes Koordinatensystem, K' ein relativ zu K gleichförmig rotierendes Koordinatensystem. Dann wirken auf relativ zu K' ruhende Massen Zentrifugalkräfte, während auf relativ zu K ruhende Massen solche nicht wirken. Hierin sah bereits NEWTON einen Beweis dafür, daß man die Rotation von K' als eine »absolute« aufzufassen habe, daß man also K' nicht mit demselben Rechte wie K als »ruhend« behandeln könne. Dies Argument ist aber — wie insbesondere E. MACH ausgeführt hat — nicht stichhaltig. Die Existenz jener Zentrifugalkräfte brauchen wir nämlich nicht notwendig auf eine Bewegung von K' zurückzuführen; wir können sie vielmehr ebensogut zurückführen auf die durchschnittliche Rotationsbewegung der ponderablen fernen Massen der Umgebung in bezug auf K' , wobei wir K' als »ruhend« behandeln. Lassen die

EINSTEIN: Die formale Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie. 1032

NEWTONSchen Gesetze der Mechanik und Gravitation eine solche Auffassung nicht zu, so kann dies sehr wohl in Mängeln dieser Theorie begründet sein. Für die relativistische Auffassung spricht andererseits folgendes wichtige Argument. Die Zentrifugalkraft, welche unter gegebenen Verhältnissen auf einen Körper wirkt, wird genau durch die gleiche Naturkonstante desselben bestimmt wie die Wirkung eines Schwerefeldes auf denselben, derart, daß wir gar kein Mittel haben, ein »Zentrifugalfeld« von einem Schwerefeld zu unterscheiden. So messen wir als Gewicht eines Körpers an der Erdoberfläche immer eine Superposition von Wirkungen von Feldern der beiden genannten Arten, ohne diese Wirkungen trennen zu können. Dadurch gewinnt die Auffassung durchaus an Berechtigung, daß wir das rotierende System K' als ruhend und das Zentrifugalfeld als ein Gravitationsfeld auffassen dürfen. Es erinnert diese Auffassung an diejenige der ursprünglichen (spezielleren) Relativitätstheorie, daß man die auf eine in einem Magnetfelde bewegte elektrische Masse wirkende ponderomotorische Kraft auch auffassen kann als die Einwirkung desjenigen elektrischen Feldes, welches vom Standpunkte eines mit der Masse bewegten Bezugssystems am Orte der Masse vorhanden ist.

Aus dem Gesagten geht schon hervor, daß in einer im angedeuteten Sinne erweiterten Relativitätstheorie die Gravitation eine fundamentale Rolle spielen muß; denn geht man von einem Bezugssystem K durch bloße Transformation zu einem Bezugssystem K' über, so existiert in bezug auf K' ein Gravitationsfeld, ohne daß in bezug auf K ein solches vorhanden zu sein braucht.

Es erhebt sich nun naturgemäß die Frage, was für Bezugssysteme und Transformationen wir in einer verallgemeinerten Relativitätstheorie als »berechtigte« anzusehen haben. Diese Frage wird sich jedoch erst viel später beantworten lassen (Abschnitt D). Einstweilen stellen wir uns auf den Standpunkt, daß alle Koordinatensysteme und Transformationen zuzulassen seien, die mit den bei physikalischen Theorien stets vorausgesetzten Bedingungen der Stetigkeit vereinbar sind. Es wird sich zeigen, daß die Relativitätstheorie einer sehr weitgehenden, von Willkür nahezu freien Verallgemeinerung fähig ist.

§ 2. Das Gravitationsfeld.

Nach der ursprünglichen Relativitätstheorie bewegt sich ein materieller Punkt, der weder Gravitationskräften noch sonstigen Kräften unterworfen ist, geradlinig und gleichförmig gemäß der Formel

$$\delta \left\{ \int ds \right\} = 0, \quad (1)$$

1033 Gesamtsitzung v. 19. Nov. 1914. — Mitth. d. phys.-math. Cl. v. 29. Oct.

wobei

$$ds^2 = - \sum_v dx_v^2 \quad (2)$$

gesetzt ist. Dabei ist $x_1 = x$, $x_2 = y$, $x_3 = z$, $x_4 = idt$ gesetzt. ds ist das Differential der »Eigenzeit«, d. h. diese Größe gibt den Betrag an, um welchen die Angabe einer mit dem materiellen Punkt bewegten Uhr auf dem Wegelement (dx, dy, dz) vorschreitet. Die Variation in (1) ist dabei so zu bilden, daß die Koordinaten x_v in den Endpunkten der Integration unvariirt bleiben.

Führt man nun eine beliebige Koordinatentransformation aus, so bleibt Gleichung (1) bestehen, während an Stelle von (2) die allgemeinere Form

$$ds^2 = \sum_{\mu\nu} g_{\mu\nu} dx_\mu dx_\nu \quad (2a)$$

tritt. Die 10 Größen $g_{\mu\nu}$ sind dabei Funktionen von den x_v , welche durch die angewandte Substitution bestimmt sind. Physikalisch bestimmen die $g_{\mu\nu}$ das in bezug auf das neue Koordinatensystem vorhandene Gravitationsfeld, wie aus den Überlegungen des vorigen Paragraphen hervorgeht. (1) und (2a) bestimmen daher die Bewegung eines materiellen Punktes in einem Gravitationsfelde, das bei passender Wahl des Bezugssystems verschwindet. Wir wollen aber verallgemeinernd annehmen, daß auch sonst die Bewegung des materiellen Punktes im Gravitationsfelde stets nach diesen Gleichungen erfolge.

Den Größen $g_{\mu\nu}$ kommt noch eine zweite Bedeutung zu. Wir können nämlich immer setzen

$$ds^2 = \sum_{\mu\nu} g_{\mu\nu} dx_\mu dx_\nu = - \sum_v dX_v^2, \quad (2b)$$

wobei die dX_v allerdings keine vollständigen Differentiale sind. Diese Größen dX_v können aber doch im Unendlichkleinen als Koordinaten verwendet werden. Es liegt deshalb die Annahme nahe, daß im Unendlichkleinen die ursprüngliche Relativitätstheorie gelte. Die dX_v sind dann die mit Einheitsmaßstäben und einer passend gewählten Einheitsuhr unmittelbar zu messenden Koordinaten in einem unendlich kleinen Gebiete. Die Größe ds^2 ist in diesem Sinne als der natürlich gemessene Abstand zweier Raum-Zeit-Punkte zu bezeichnen. Dagegen können die dx_v nicht in gleicher Weise durch Messung mit starren Körpern und Uhren direkt gewonnen werden. Sie hängen vielmehr mit dem natürlich gemessenen Abstand ds zusammen in einer gemäß (2b) durch die Größen $g_{\mu\nu}$ bestimmten Weise.

Nach dem Gesagten ist ds eine von der Wahl des Koordinatensystems unabhängige definierbare Größe, d. h. ein Skalar. ds spielt in