5. *Über Friedrich Kottlers Abhandlung „Über Einsteins Äquivalenzhypothese und die Gravitation“*[1]*;*

von A. Einstein.

Unter den Arbeiten, welche sich kritisch mit der allgemeinen Relativitätstheorie beschäftigen, sind besonders diejenigen Kottlers bemerkenswert, denn dieser Fachgenosse ist wirklich in den Geist der Theorie eingedrungen. Mit der letzten dieser Arbeiten will ich mich hier auseinandersetzen.

Kottler behauptet, ich hätte das von mir aufgestellte „Äquivalenzprinzip“, durch welches ich die Begriffe der „trägen Masse“ und der „schweren Masse“ zu einem einheitlichen Begriffe zu vereinigen strebte, in meinen späteren Arbeiten wieder aufgegeben. Diese Meinung muß darauf beruhen, daß wir beide nicht dasselbe als „Äquivalenzprinzip“ bezeichnen; denn nach meiner Auffassung ruht meine Theorie ausschließlich auf diesem Prinzip. Deshalb sei folgendes wiederholt:

1. *Der Grenzfall der speziellen Relativitätstheorie.* Ein raumzeitlich endliches Gebiet sei frei von einem Gravitationsfelde, d. h. es sei möglich, ein Bezugssystem K („Galileisches System“) aufzustellen, relativ zu welchem für das genannte Gebiet folgendes gilt. Koordinaten seien in bekannter Weise mit dem Einheitsmaßstab, Zeiten mit der Einheitsuhr unmittelbar meßbar, wie dies in der speziellen Relativitätstheorie vorausgesetzt zu werden pflegt. In bezug auf dieses System bewege sich ein isolierter materieller Punkt geradlinig und gleichförmig, wie es von Galilei vorausgesetzt wurde.

2. *Äquivalenzprinzip.* Ausgehend von diesem Grenzfall der speziellen Relativitätstheorie kann man sich fragen, ob

---

[1] Ann. d. Phys. **50.** p. 955. 1916.

ein in dem betrachteten Gebiete relativ zu K gleichförmig beschleunigter Beobachter seinen Zustand als beschleunigt auffassen muß, oder ob ihm nach den (angenähert) bekannten Naturgesetzen eine Auffassung übrig bleibt, vermöge derer er seinen Zustand als „Ruhe“ deuten kann. Präziser ausgedrückt: Erlauben uns die in gewisser Annäherung bekannten Naturgesetze ein in bezug auf K gleichförmig beschleunigtes Bezugssystem K' als ruhend zu betrachten? Oder etwas allgemeiner: Läßt sich das Relativitätsprinzip auch auf relativ zueinander (gleichförmig) beschleunigte Bezugssysteme ausdehnen? Die Antwort lautet: Soweit wir die Naturgesetze wirklich kennen, hindert uns nichts daran, das System K' als ruhend zu betrachten, wenn wir relativ zu K' ein (in erster Annäherung homogenes) Schwerefeld als vorhanden annehmen; denn wie in einem homogenen Schwerefeld, so auch in bezug auf unser System K' fallen alle Körper unabhängig von ihrer physikalischen Natur mit derselben Beschleunigung. Die Voraussetzung, daß man in aller Strenge K' als ruhend behandeln dürfe, ohne daß irgendein Naturgesetz in bezug auf K' nicht erfüllt wäre, nenne ich „Äquivalenzprinzip“.

3. *Das Schwerefeld nicht nur kinematisch bedingt.* Man kann die vorige Betrachtung auch umkehren. Sei das mit dem oben betrachteten Schwerefelde ausgestaltete System K' das ursprüngliche. Dann kann man ein neues, gegen K' beschleunigtes Bezugssystem K einführen, mit Bezug auf welches sich (isolierte) Massen (in dem betrachteten Gebiete) geradlinig gleichförmig bewegen. Aber man darf nun *nicht* weitergehen und sagen: Ist K' ein mit einem *beliebigen* Gravitationsfeld versehenes Bezugssystem, so ist stets ein Bezugssystem K auffindbar, in bezug auf welches sich isolierte Massen geradlinig gleichförmig bewegen, d. h. in bezug auf welches kein Gravitationsfeld existiert. Die Absurdität einer solchen Voraussetzung liegt auf der Hand. Ist das Gravitationsfeld in bezug auf K' zum Beispiel das eines ruhenden Massenpunktes, so läßt sich dieses Feld für die ganze Umgebung des Massenpunktes gewiß durch kein noch so feines Transformationskunststück hinwegtransformieren. Man darf also keineswegs behaupten, das Gravitationsfeld sei gewissermaßen rein kinematisch zu erklären; eine „kinematische, nicht dynamische Auffassung der Gravitation“ ist nicht möglich. Durch bloße Trans-

formation aus einem Galileischen System in ein anderes durch Beschleunigungstransformationen lernen wir also nicht *beliebige* Gravitationsfelder kennen, sondern solche ganz spezieller Art, welche aber doch denselben Gesetzen genügen müssen wie alle anderen Gravitationsfelder. Dies ist nur wieder eine andere Formulierung des Äquivalenzpinzips (speziell in seiner Anwendung auf die Gravitation).

Eine Gravitationstheorie verletzt also das Äquivalenzprinzip in dem Sinne, wie ich es verstehe, nur dann, wenn die Gleichungen der Gravitation in *keinem* Bezugssystem K' erfüllt sind, welches relativ zu einem galileischen Bezugssystem ungleichförmig bewegt ist. Daß dieser Vorwurf gegen meine Theorie mit *allgemein* kovarianten Gleichungen nicht erhoben werden kann, ist evident; denn hier sind die Gleichungen bezüglich eines jeden Bezugssystems erfüllt. *Die Forderung der allgemeinen Kovarianz der Gleichungen umfaßt die des Äquivalenzprinzips als ganz speziellen Fall.*

4. *Sind die Kräfte des Gravitationsfeldes „reale“ Kräfte?* Kottler rügt es, daß ich in den Bewegungsgleichungen

$$\frac{d^2 x_\nu}{d s^2} + \sum_{\alpha\beta} \left\{ {\alpha\beta \atop \nu} \right\} \frac{d x_\alpha}{d s} \frac{d x_\beta}{d s} = 0$$

das zweite Glied als den Ausdruck des Einflusses des Schwerefeldes auf den Massenpunkt, das erste Glied gewissermaßen als den Ausdruck der Galileischen Trägheit interpretiere. Dadurch würden „wirkliche Kräfte des Schwerefeldes“ eingeführt, was dem Geiste des Äquivalenzprinzipes nicht entspreche. Hierauf antworte ich, daß jene Gleichung als Ganzes allgemein kovariant, also jedenfalls der Äquivalenzhypothese gemäß ist. Die von mir eingeführte Benennung der Teile ist prinzipiell bedeutungslos und einzig dazu bestimmt, unseren physikalischen Denkgewohnheiten entgegenzukommen. Dies gilt auch insbesondere von den Begriffen

$$\Gamma^{\nu}_{\alpha\beta} = - \left\{ {\alpha\beta \atop \nu} \right\}$$

(Komponenten des Gravitationsfeldes) und t_σ^ν (Energiekomponenten des Gravitationsfeldes). Die Einführung dieser Benennungen ist prinzipiell unnötig, erscheint mir aber für die Aufrechterhaltung der Kontinuität der Gedanken wenigstens einstweilen nicht wertlos; deshalb habe ich diese Größen eingeführt, trotzdem ihnen kein Tensorcharakter zukommt. Dem Äquivalenzprinzip aber ist stets Genüge geleistet, wenn die Gleichungen kovariant sind.

5. Es ist wahr, daß ich die allgemeine Kovarianz der Gleichungen durch das Aufgeben der gewöhnlichen Zeitmessung und der Euklidischen Raummessung habe erkaufen müssen. Kottler glaubt ohne dies Opfer auskommen zu können. Aber bereits im Falle des von ihm betrachteten im Bornschen Sinne relativ zu einem Galileischen System beschleunigten Systems K' muß man auf die gewöhnliche Zeitmessung verzichten. Da ist vom Standpunkt der Relativitätstheorie der Gedanke schon naheliegend, daß auch die gewöhnliche Raummessung aufgegeben werden müsse. Von dieser Notwendigkeit wird sich Hr. Kottler sicherlich selbst überzeugen, wenn er die ihm vorschwebenden theoretischen Pläne allgemein durchzuführen suchen wird.

Oktober 1916.

(Eingegangen 19. Oktober 1916.)